

**ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DE UM MOTOR DE
INDUÇÃO SUBMETIDO CONJUNTA E INDIVIDUALMENTE
A DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIOS DE
TENSÃO: ENSAIOS LABORATORIAIS E SIMULAÇÕES
COMPUTACIONAIS**

GUILHERME ZANETTI ROSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Publicação: ENE/PPGEE
Brasília - DF, julho de 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DE UM MOTOR DE
INDUÇÃO SUBMETIDO CONJUNTA E
INDIVIDUALMENTE A DISTORÇÕES HARMÔNICAS E
DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO: ENSAIOS
LABORATORIAIS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.**

GUILHERME ZANETTI ROSA

ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM – 705/2018

BRASÍLIA/DF: JULHO – 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO
SUBMETIDO CONJUNTA E INDIVIDUALMENTE A DISTORÇÕES
HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO: ENSAIOS
LABORATORIAIS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

GUILHERME ZANETTI ROSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



ANÉSIO DE LELES FERREIRA, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



ALEX REIS, Dr., FGA/UNB
(EXAMINADOR INTERNO NÃO VINCULADO AO PROGRAMA)



MARCUS VINÍCIUS BORGES MENDONÇA, Dr., UFTM
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 31 de julho de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

ROSA, GUILHERME ZANETTI

Análise das Temperaturas de um Motor de Indução Submetido Conjunta e Individualmente a Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensão: Ensaio Laboratoriais e Simulações Computacionais [Distrito Federal] 2018.

109p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia).

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1. Desequilíbrio de Tensão | 2. Distorção Harmônica de Tensão |
| 3. Motor de Indução Trifásico | 4. Modelagem Térmica Computacional |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROSA, G. Z. (2018). Análise das Temperaturas de um Motor de Indução Submetido Conjunta e Individualmente a Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensão: Ensaio Laboratoriais e Simulações Computacionais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM – 705/2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Guilherme Zanetti Rosa.

TÍTULO: Análise das Temperaturas de um Motor de Indução Submetido Conjunta e Individualmente a Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensão: Ensaio Laboratoriais e Simulações Computacionais.

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Guilherme Zanetti Rosa
guilherme.zr@gmail.com
Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

À minha amada esposa Janiny, pelo companheirismo de todos os momentos e incentivo na realização deste trabalho.

À minha mãe, pelo amor e carinho de uma vida e pelo enorme esforço despendido para que seus filhos pudessem obter excelentes condições de educação.

Ao professor Anésio, pela oportunidade oferecida de ingressar no PPGEE, por ter confiado a mim o desenvolvimento desta pesquisa e pelo fundamental e competente trabalho de orientação desempenhado ao longo deste período.

Ao colega de laboratório Marcos Diego de Castro e Silva, cuja extraordinária habilidade na execução dos procedimentos laboratoriais e computacionais foi de fundamental importância para o alcance dos objetivos desta dissertação.

Ao colega de laboratório Christian Chukwuemeka Abada, pela ajuda dispensada em diversos momentos da elaboração deste trabalho.

Aos meus superiores hierárquicos no Ministério de Minas e Energia, Thiago Prado, Cássio Carvalho e Moacir Bertol, pelo incentivo dado à esta capacitação.

A todos os queridos amigos que tenho na minha vida.

Dedico este trabalho ao meu filho Daniel.

Que o seu empenho seja sempre acompanhado por grandes conquistas.

RESUMO

ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO SUBMETIDO CONJUNTA E INDIVIDUALMENTE A DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO: ENSAIOS LABORATORIAIS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Autor: Guilherme Zanetti Rosa

Orientador: Anésio de Leles Ferreira Filho

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, 31 de julho de 2018

O uso de cargas monofásicas desequilibradas, o aumento de cargas não lineares e de fontes renováveis no sistema elétrico, dentre outras causas, têm contribuído para o surgimento de fenômenos como o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica nas redes de distribuição. Tais distúrbios causam impactos significativos na operação do motor de indução trifásico (MIT). Dado que essa máquina possui grande representatividade elétrica e econômica nos processos industriais, torna-se relevante o conhecimento do seu comportamento frente à ocorrência dos mencionados desvios de qualidade da energia. Os dispositivos normativos vigentes, nacionais e internacionais, indicam limites individualizados para cada um desses fenômenos. No entanto, verifica-se corriqueiramente a sua ocorrência simultânea nos sistemas elétricos.

Considerando os aspectos ora mencionados, este trabalho apresenta os resultados do comportamento da temperatura de operação do motor de indução trifásico submetido a variados níveis de desequilíbrios de tensão e de distorção harmônica, aplicados individualmente e concomitantemente. Inicialmente, a metodologia empregada faz uso de um modelo térmico computacional capaz de identificar a temperatura de operação da máquina sob condições não ideais, com base em dados de entrada de corrente elétrica. Em seguida, são então apresentados resultados para a temperatura de operação sob condições desequilibradas e distorcidas.

Com base nos dados obtidos, torna-se possível a verificação da adequabilidade de indicadores e limites normativos existentes relacionados a esses distúrbios. Adicionalmente, é efetuada a análise do desempenho de dois indicadores alternativos utilizados para a representação conjunta dos mencionados fenômenos.

Palavras-chave: Qualidade da Energia, Desequilíbrio de Tensão, Distorção Harmônica, Motor de Indução Trifásico, Temperatura, Modelo Térmico, Normas.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE TEMPERATURES OF AN INDUCTION MOTOR SUBMITTED INDIVIDUALLY AND SIMULTANEOUSLY TO HARMONIC DISTORTIONS AND VOLTAGE UNBALANCES: LABORATORY TESTS AND COMPUTATIONAL SIMULATIONS

Author: Guilherme Zanetti Rosa

Supervisor: Anésio de Leles Ferreira Filho

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, 31 July 2018

The use of unbalanced single-phase loads, the increase of nonlinear loads and renewable sources in the electrical system, among other causes, have contributed to the appearance of phenomena such as voltage unbalance and harmonic distortion in the distribution networks. Such disturbances cause significant impacts on the operation of the three-phase induction motor (MIT). Given that this machine has great electrical and economical representation in the industrial processes, it becomes relevant the knowledge of its behavior against the occurrence of the mentioned Power Quality disturbances. The current regulatory items, national and international, indicate individual limits for each of these phenomena. However, their simultaneous occurrence in electrical systems is usual.

Considering the aspects mentioned, this work presents the results of the behavior of the operating temperature of the three-phase induction motor subjected to varying levels of voltage unbalance and harmonic distortion, applied individually and concomitantly. Initially, the methodology employed makes use of a computational thermal model capable of identifying the operating temperature of the machine under non-ideal conditions, based on data of electric current input. Thereafter, results are presented for the operating temperature under unbalanced and distorted conditions.

Based on the data obtained, it becomes possible to verify the adequacy of indicators and existing regulatory limits related to these disturbances. In addition, the performance of two alternative indicators used for the joint representation of these phenomena is analyzed.

Keywords: Power Quality, Voltage Unbalance, Harmonic Distortion, Three-Phase Induction Motor, Temperature, Thermal Model, Regulatory Standards.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 – ESTADO DA ARTE	4
1.3 - OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	12
1.4 – CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	14
1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	14
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
2.2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	16
2.2.1 – Definição	16
2.2.2 – Causas e Efeitos	17
2.2.3 – Métodos de Quantificação.....	18
2.2.3.1 – Método das Componentes Simétricas.....	18
2.2.3.2 – Método CIGRÉ.....	20
2.2.3.3 – Método NEMA	20
2.2.3.4 – Método IEEE	21
2.2.4 – Limites Normativos para o Desequilíbrio de Tensão	22
2.2.4.1 – IEC 61000.....	22
2.2.4.2 – IEEE 1159-2009	22
2.2.4.3 – ANSI C84.1-2016.....	23
2.2.4.4 – PRODIST.....	23
2.3 – DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	24
2.3.1 – Definição	24
2.3.2 – Causas e Efeitos	26
2.3.3 – Métodos de Quantificação.....	27
2.3.4 – Limites Normativos para a Distorção Harmônica de Tensão	27
2.3.4.1 – IEEE-519-1992.....	28
2.3.4.2 – IEC 61000.....	28
2.3.4.3 – PRODIST.....	29
2.4 – MODELAGEM TÉRMICA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	29
2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31

3 -	METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA LABORATORIAL.....	33
3.1 -	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	33
3.2 -	INFRAESTRUTURA LABORATORIAL.....	33
3.3 -	ENSAIOS PARA CONDIÇÃO NOMINAL.....	36
3.4 -	BANCOS DE DADOS.....	38
	3.4.1 - Banco de dados para desequilíbrio de tensão.....	38
	3.4.2 - Banco de dados para distorção harmônica.....	39
	3.4.3 - Banco de dados com a ocorrência de ambos os fenômenos simultaneamente.....	41
3.5 -	MODELAGEM TÉRMICA DO MOTOR.....	42
	3.5.1 - Definição da modelagem térmica.....	42
	3.5.2 - Validação do modelo em laboratório.....	45
3.6 -	ANÁLISES DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS INDICADORES.....	48
	3.6.1 - Análise do banco de dados com somente desequilíbrio de tensão.....	49
	3.6.2 - Análise do banco de dados com somente distorção harmônica.....	49
	3.6.3 - Comparação entre os efeitos individuais do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica.....	50
	3.6.4 - Análise das condições contendo ambos os fenômenos simultaneamente.....	50
	3.6.5 - Análise dos efeitos - caso selecionado.....	51
	3.6.6 - Adequabilidade de indicadores de QEE propostos.....	51
3.7 -	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
4 -	RESULTADOS.....	55
4.1 -	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	55
4.2 -	RESULTADOS PARA AS CONDIÇÕES COM SOMENTE A PRESENÇA DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	55
4.3 -	RESULTADOS PARA AS CONDIÇÕES COM SOMENTE A PRESENÇA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	57
4.4 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS INDIVIDUAIS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	59
4.5 -	RESULTADOS PARA AS CONDIÇÕES CONTENDO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DISTORÇÃO HARMÔNICA SIMULTANEAMENTE.....	60
4.6 -	ANÁLISE DA COMPARAÇÃO DOS EFEITOS - CASO SELECIONADO....	64
4.7 -	DESEMPENHO DOS INDICADORES DE QEE PROPOSTOS.....	65
	4.7.1 - Indicador pela regressão dos pontos médios.....	66

4.7.2 – Indicador baseado em parâmetros provenientes da transformada dq069	
4.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	73
5.1 - CONCLUSÕES	73
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE	80
A - VALORES CONSTANTES NOS BANCOS DE DADOS	81
A.1 – SOMENTE DESEQUILÍBRIO	81
A.2 – SOMENTE HARMÔNICAS	91
A.3 – COMBINAÇÃO DE AMBOS OS DISTÚRBIOS	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal	28
Tabela 2.2 - Limites de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) impostos pelas normas IEC 61000-2-2. e IEC 61000-3-6.....	29
Tabela 2.3 - Limites das distorções harmônicas totais impostos pelo PRODIST para tensão nominal (V_n) menor ou igual a 1 kV (em % da tensão fundamental).	29
Tabela 3.1 - Resultados do ensaio do MIT sob condições nominais de alimentação e carregamento.	36
Tabela 3.2 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados de desequilíbrio de tensão.	38
Tabela 3.3 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados de distorção harmônica – Somente 1 ordem.	39
Tabela 3.4 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados de distorção harmônica – 2 ordens simultâneas.....	40
Tabela 3.5 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados com ambos os fenômenos simultaneamente.....	41
Tabela 3.6 – Grandezas empregadas nas regressões não lineares para a obtenção dos coeficientes do modelo térmico do MIT.....	46
Tabela 3.7 – Erro médio, erro máximo e desvio padrão resultantes da etapa de validação do modelo térmico.	47
Tabela 3.8 – Parâmetros para o modelo térmico após a validação em laboratório	48
Tabela 4.1 – Resultados para as condições com somente desequilíbrio.	56
Tabela 4.2 – Quadro comparativo para a faixa de variação dos resultados na ocorrência somente de desequilíbrio e de ambos os fenômenos simultaneamente.	63
Tabela 4.3 – Seleção de valores dos Bancos de Dados que atendem aos critérios $FD\% = 2\%$ e $DTT\% = 5\%$	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de onda distorcida decomposta por meio da Série de Fourier (Chapman, 2005).	24
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do sistema de controle e geração de relatórios de saída.	34
Figura 3.2– Temperatura de operação sob condições de alimentação e carga nominais. ...	37
Figura 3.3 – Representação do modelo pelo circuito térmico do MIT (Silva, 2014).....	43
Figura 4.1 – Temperatura de operação sob condições de desequilíbrio de tensão.....	56
Figura 4.2 – Temperatura de operação sob condições de distorção harmônica de tensão. .	58
Figura 4.3 – Comparação entre a aplicação individual dos distúrbios.	59
Figura 4.4 – (a) Eixo tridimensional com o resultado para a aplicação de ambos os fenômenos simultaneamente, em função de $FD\%$ e $DTT\%$; (b) Visão lateral: Temperatura x $DTT\%$; e (c) Visão lateral: Temperatura x $FD\%$	61
Figura 4.5 – Temperatura de operação sob condições de desequilíbrio de tensão.....	62
Figura 4.6 – Faixa de variação da temperatura a ocorrência só de desequilíbrio e de ambos os fenômenos simultâneos.	63
Figura 4.7 a) Temperatura em função da $DTT\%$, para as condições que envolvem a 2ª harmônica. b) Temperatura em função do $FD\%$: todos os casos.	67
Figura 4.8 Temperatura em função do Indicador Regressões normalizado e do $FD\%$	68
Figura 4.9 a) Temperatura em função do Indicador $FDu\%$. b) Temperatura em função do Indicador $FHu\%$	69
Figura 4.10 a) Temperatura em função do $FQu\%$ normalizado e do $FD\%$	70

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

Nomenclaturas:

- ANSI - *American National Standards Institute*;
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;
CIGRÉ - *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*;
IEC - *International Electrotechnical Commission*;
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
MIT - Motor de Indução trifásico;
NEMA - *National Electrical Manufacturers Association*;
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico;
QEE - Qualidade da Energia Elétrica;
REILab - Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes, UnB

Símbolos:

- θ_0 - ângulo do fasor da componente de tensão de sequência zero;
 θ_2 - ângulo do fasor da componente de tensão de sequência negativa;
 θ_A - ângulo da tensão na fase A;
 θ_B - ângulo da tensão na fase B;
 θ_C - ângulo da tensão na fase C;
 $DIT_h\%$ - distorção harmônica individual de tensão de ordem h
 $DTT\%$ - distorção harmônica total de tensão de ordem
 $FD\%$ - fator de desequilíbrio
 V_0 - módulo do fasor da componente de tensão de sequência zero;
 V_1 - módulo do fasor da componente de tensão de sequência positiva;
 V_2 - módulo do fasor da componente de tensão de sequência negativa;
 V_A - módulo da tensão na fase A;
 V_B - módulo da tensão na fase B;
 V_C - módulo da tensão na fase C;
 V_{AB} - módulo da tensão de linha entre as fases A e B;
 V_{BC} - módulo da tensão de linha entre as fases B e C;
 V_{CA} - módulo da tensão de linha entre as fases C e A;

VUF_0	- <i>Zero Voltage Unbalance Factor</i> . Fator de desequilíbrio de tensão de sequência zero
VUF_2	- <i>Negative Voltage Unbalance Factor</i> . Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa
$LVUR$	- <i>Line Voltage Unbalance Rate</i> . Razão de desequilíbrio de tensão de linha calculado pelo método ANSI/NEMA
Q_A	- calor gerado no enrolamentos do estator da fase A (W);
Q_B	- calor gerado no enrolamentos do estator da fase B (W);
Q_C	- calor gerado no enrolamentos do estator da fase C (W);
Q_{AB}	- calor trocado entre as fases A e B dos enrolamentos do estator (W);
Q_{BC}	- calor trocado entre as fases B e C dos enrolamentos do estator (W);
Q_{CA}	- calor trocado entre as fases C e A dos enrolamentos do estator (W);
Q_{AAmb}	- calor do enrolamento da fase A do estator perdido para o ar ambiente (W);
Q_{BAmb}	- calor do enrolamento da fase B do estator perdido para o ar ambiente (W);
Q_{CAmb}	- calor do enrolamento da fase C do estator perdido para o ar ambiente (W);
T_A	- temperatura no enrolamento do estator na fase A (°C);
T_B	- temperatura no enrolamento do estator na fase B (°C);
T_C	- temperatura no enrolamento do estator na fase C (°C);
T_{Amb}	- temperatura do ar ambiente (°C);
R_A	- resistência elétrica do enrolamento do estator da fase A;
R_B	- resistência elétrica do enrolamento do estator da fase B;
R_C	- resistência elétrica do enrolamento do estator da fase C;
$I_r\%$	- Indicador calculado com base nas regressões dos valores médios dos resultados para condições com desequilíbrio e harmônicas simultaneamente;
k_A	- coeficiente de condutividade térmica entre o enrolamento do estator na fase A e o ar ambiente (W/°C);
k_B	- coeficiente de condutividade térmica entre o enrolamentos do estator na fase B e o ar ambiente (W/°C);
k_C	- coeficiente de condutividade térmica entre o enrolamento do estator na fase B e o ar ambiente (W/°C);
k_{AB}	- coeficiente de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator na fase A e B (W/°C);
k_{BC}	- coeficiente de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator na fase B e C (W/°C);
k_{CA}	- coeficiente de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator na fase C e A (W/°C);
T_{MAX}	- máxima temperatura entre as três fases dos enrolamentos do estator do MIT.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desejado crescimento econômico brasileiro esbarra na disponibilidade de maior capacidade de geração da sua matriz energética, cuja expansão é limitada por restrições de ordem financeira e ambiental. Com o crescimento global das demandas energéticas e uma oferta restrita de recursos naturais, um cenário de prosperidade econômica está cada vez mais atrelado a investimentos que considerem soluções ótimas no uso das cargas em um sistema elétrico. Consumir energia de maneira racional significa buscar o máximo desempenho de uma instalação submetida a um fornecimento elétrico limitado e financeiramente dispendioso. Em decorrência, o consumo consciente e inteligente de energia reduz os gastos com este insumo e maximiza os investimentos já efetuados no sistema. Dessa forma, há a possibilidade de ampliação dos recursos renováveis e não renováveis ainda disponíveis, incentivo à modernização das empresas e o consequente impacto positivo no aumento da produtividade da indústria e da competitividade dos produtos fabricados (Braga, 2007).

Um dos requisitos para se alcançar o uso otimizado dos recursos energéticos é a observância dos índices de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), na medida em que a deterioração dos seus parâmetros ocasiona, de uma forma geral, aumento das perdas elétricas no Sistema e redução da eficiência e vida útil de equipamentos submetidos a tais distúrbios. O termo QEE se relaciona a um conjunto de alterações na rede a que o fornecimento de energia e os consumidores estão suscetíveis. Várias pesquisas vêm sendo conduzidas com o intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento dos sistemas elétricos (Souto, 2001).

Do ponto de vista do consumidor, é possível definir QEE como sendo o fornecimento de energia elétrica sob regime de tensão em conformidade com parâmetros estabelecidos em norma específica do órgão regulador e compatível com os requisitos técnicos necessários à operação adequada dos equipamentos eletroeletrônicos, garantindo assim a maximização da vida útil desses aparelhos. Em que pesem as boas ações promovidas ao longo do tempo, especialmente nos últimos 20 anos, após a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL), a regulamentação sobre o tema Qualidade da Energia Elétrica ainda é tecnicamente insuficiente para atender aos anseios e aos verdadeiros direitos dos consumidores. Faz-se necessário maior rigor por parte do regulador em exigir dos agentes a promoção de ações direcionadas à oferta de um serviço de qualidade efetiva, realmente percebida de forma ampla pela sociedade (Jannuzi, 2007).

O prejuízo causado pelos distúrbios na energia de suprimento é alto e crescente. A publicação (Rea, 2016) estima que o custo para a indústria decorrente de fenômenos ligados à QEE em países da União Europeia é de 150 bilhões de Euros ao ano, o que representa cerca de 4% da receita anual desse setor no bloco econômico.

No Brasil, estima-se que a demanda energética do setor industrial evolua a uma taxa média de anual de crescimento de 2,2% entre 2013-2050, resultando em um aumento consolidado de mais de 223% em relação ao ano inicial (EPE, 2016). Esses números evidenciam a importância de as empresas considerarem os impactos econômicos de distúrbios de QEE e os custos associados à prevenção e mitigação desse tipo de ocorrência.

Motores de Indução Trifásicos (MIT) são máquinas amplamente utilizadas nos setores industrial e comercial devido à sua robustez, simplicidade e relativo baixo custo de aquisição e manutenção. O trabalho (Quispe, 2013) afirma que aproximadamente 68% da demanda elétrica mundial é consumida no setor industrial e 46% do total de consumo de energia elétrica no planeta são usados na alimentação de motores elétricos. Essa estatística justifica a necessidade do conhecimento do estado de operação desse equipamento para um gerenciamento eficiente dos indicadores de desempenho energético e dos custos de produção em uma planta industrial.

Por essas razões, nas últimas décadas, estudos relacionados à QEE têm despertado o interesse das distribuidoras de energia elétrica, dos órgãos reguladores, dos pesquisadores e, em especial, dos consumidores, que têm buscado a normatização, a quantificação, a identificação de causas e efeitos, e a redução das consequências advindas dos distúrbios (Dugan, 1996) (Januzzi, 2007).

É sabido que a tensão fornecida pelas distribuidoras corriqueiramente apresenta distorções de qualidade fora do padrão ideal para um sistema (Jesus, 2007). Dentre essas ocorrências,

pode-se ressaltar as distorções harmônicas e os desequilíbrios de tensão, objetos de análise nesta dissertação.

É notório que a presença de altos níveis de desequilíbrio de tensão provoca, dentre outras consequências, perdas excessivas, sobreaquecimento, solicitação do isolamento e redução da vida útil de motores e transformadores, além do acionamento indevido dos seus sistemas de proteção, levando à parada dos processos de produção (Ferreira Filho, 2008).

Da mesma forma, efeitos danosos à operação da máquina são observados quando da ocorrência de distorções harmônicas de tensão na rede elétrica de alimentação. A depender da característica desse distúrbio, há a possibilidade de aumento nas perdas elétricas no cobre e no entreferro, o que culmina em aumento da temperatura de operação e consequente redução da vida útil do motor, além da deterioração da sua eficiência (Abreu, 2002) (Brito, 2006).

No Brasil, a ANEEL elaborou o manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2017), que conceitua e fornece alguns limites para esses fenômenos nas redes de Distribuição. Da mesma forma, nos Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2016) estabelece os indicadores de desempenho dos índices de QEE para a Rede Básica. Apesar disso, a literatura indica que a regulamentação relativa à Qualidade da Energia, de uma forma geral, não protege as máquinas de indução de forma satisfatória. O autor (Gnacinski, 2008b) expõe em seu trabalho que essas máquinas permanecem expostas ao superaquecimento ainda que os índices de qualidade da sua rede de atendimento atendam aos requisitos dos órgãos reguladores.

Nesse contexto, ressaltadas a representatividade econômica do motor de indução na indústria e o desempenho insatisfatório dos índices de Qualidade da Energia corriqueiramente verificados nos sistemas de distribuição, torna-se importante o conhecimento amplo do comportamento dessa máquina frente aos diversos tipos de distúrbios presentes na rede elétrica. Por conseguinte, avaliação das melhores formas de prevenção e mitigação da ocorrência de danos físicos e prejuízos financeiros que o mau funcionamento do MIT pode acarretar às instalações, deve ser realizada.

1.2 – ESTADO DA ARTE

Este tópico tem por objetivo apresentar as publicações mais relevantes relacionadas à temática proposta nesta dissertação, evidenciando a evolução ao longo dos anos e indicando as lacunas ainda existentes para pesquisas futuras.

Alguns trabalhos como (Lee, 1999) (Faiz, 2005) e (Ferreira Filho, 2010) afirmam e comprovam que a utilização apenas do $FD\%$ não reflete com clareza a condição de desequilíbrio.

Em (Silva, 2014) foi avaliada a influência das componentes de sequência positiva, negativa e zero sobre as temperaturas nas fases dos enrolamentos do estator de um MIT. Para tanto, o autor utilizou resultados experimentais associados a respostas de simulações computacionais. Inicialmente, desenvolveu-se um modelo térmico simplificado do motor. Empregando-se resultados de ensaios laboratoriais, foram efetuadas a estimação dos parâmetros do modelo e também a sua validação, mediante a utilização de cerca de 2.000 condições de alimentação contendo diversos valores de desequilíbrio de tensão. Então, com o modelo computacional consolidado, procedeu-se a realização de mais de 2,5 milhões de simulações com resultados para a temperatura do MIT alimentado por condições de desequilíbrio de tensão. Dessa forma desenvolveu-se uma análise detalhada sobre o comportamento do MIT submetido a esse fenômeno. Conclui-se que a contribuição do VUF_0 , em relação às correntes e temperaturas, é semelhante à contribuição do VUF_2 . A proporção pela qual o VUF_0 e o VUF_2 influenciam a corrente e a temperatura não se altera de maneira significativa em relação a mudanças nas amplitudes de V_1 . Observou-se que, para o MIT em estudo (tensão nominal de fase dos enrolamentos igual a 220 V), condições contendo desequilíbrios de tensões com V_1 menor que 220 V se mostraram menos prejudiciais quando comparadas àquelas onde o V_1 se encontra acima do mencionado patamar. Verificou-se ainda que a temperatura se apresentou mais sensível às variações angulares em θ_0 do que aos demais parâmetros. Por fim, constatou-se que, ao se conhecer os valores de V_1 , VUF_0 , VUF_2 e θ_2 , é possível determinar com precisão a corrente e a temperatura em cada fase em função de θ_0 e θ_2 . De acordo com o autor, os ângulos de θ_0 e θ_2 são os parâmetros que mais influenciam as correntes e as temperaturas de um MIT

submetido a desequilíbrio de tensão, seguidos pelos indicadores VUF_0 e VUF_2 , V_1 , nessa ordem.

O trabalho (Silva, 2014) conseguiu apresentar de forma ampla o comportamento da temperatura do MIT em relação a todos os componentes de sequência para tensões desequilibradas. Os resultados foram obtidos com a realização de simulações envolvendo um número considerável de condições de entrada e em um modelo previamente validado em laboratório, possibilitando assim a descrição do comportamento da temperatura de operação do motor frente a esse fenômeno.

Em (Lee, 1998) foram apresentados os resultados de ensaios realizados em um MIT com o objetivo de investigar o seu desempenho quando da sua submissão a distorções harmônicas de tensão. Os índices monitorados foram eficiência, temperatura e vibração no eixo. Os testes revelaram que, para a eficiência do motor, os efeitos de ordens harmônicas de menor frequência são mais nocivos do que aqueles provocados por ordens harmônicas de maior frequência. Para um $DTT\% = 10\%$, a diferença de eficiência entre a ordem harmônica de frequência mais elevada ($n = 13$) e a de frequência mais baixa ($n = 2$) foi de 2,972%. Quanto à temperatura, demonstrou-se que as harmônicas de ordem inferior (preponderantemente menores ou iguais a 5) têm efeitos mais significativos do que aquelas de ordem mais alta (maiores ou iguais a 5). Por outro lado, o aumento das temperaturas de operação foi verificado para todas as ordens harmônicas, mostrando que este fenômeno tem impacto direto na temperatura do motor.

O artigo (Brito, 2006) realiza simulações utilizando o modelo clássico do MIT para obter o comportamento de diversos parâmetros em função da distorção harmônica de tensão. Para tanto, são realizadas simulações computacionais com o uso do efeito da superposição no modelo elétrico do motor, de forma a se considerar os diferentes níveis de frequência do sinal de tensão contendo distorção harmônica. O modelo proposto avaliou o comportamento eletromecânico em regime permanente de um motor de indução de 3 hp, 220 V, 60 Hz, 4 polos, submetido a tensões distorcidas com $DTT \leq 20\%$, com harmônicas de sequência positiva e negativa até a 13ª ordem e motor com carga nominal. De acordo com o autor, a variação do torque médio é desprezível. No entanto, a corrente de alimentação do motor sofre elevação considerável devido às altas correntes de sequência positiva e negativa que surgem nos seus terminais em função da sua tensão de alimentação distorcida. O autor

conclui que o MIT tem seu comportamento afetado de forma considerável no caso de ordens harmônicas maiores ou iguais a 4 somente para uma DTT maior que 10%. A harmônica de 2ª ordem causou efeitos significativos ao MIT para uma DTT menor que 10%. O autor finaliza a exposição sugerindo como aperfeiçoamento para o modelo a consideração de perdas por efeito pelicular, perdas magnéticas por histerese e correntes parasitas, as quais sofrem influência da variação das frequências das componentes harmônicas e não foram consideradas nesse caso estudado.

A dissertação (Neves, 2014) discorre sobre os efeitos da aplicação conjunta do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica no conjugado e no rendimento de um motor de indução trifásico. A autora realizou ensaios em laboratório em um MIT de 1,5 kW. As condições ensaiadas foram selecionadas com base em valores de tensões desequilibradas variando de 189 V até 231 V, e distorção harmônica de ordens 2, 4, 5 e 7, sendo essas ordens harmônicas aplicadas individualmente e em combinações de duas ordens. Dentre os resultados encontrados, a autora destaca que o Fator de Desequilíbrio não é um bom indicador para relacionar o desequilíbrio aos efeitos no conjugado e no rendimento. No entanto, a corrente de sequência negativa (I_2) mostrou-se um bom indicador para o valor do conjugado. A corrente I_2 será maior, quanto mais baixo for o conjugado. Ainda, foi verificado que a presença de duas harmônicas de frequências diferentes causa efeitos mais nocivos que aqueles provocados quando da aplicação de apenas uma ordem. Mostrou-se evidente em vários casos que a alteração do valor da tensão na fundamental é mais significativa para o rendimento e o conjugado do motor do que a inserção de harmônicas. O estudo evidenciou que ocorre uma redução considerável no conjugado e no rendimento devido à presença de desequilíbrio e distorção harmônica aplicados simultaneamente, quando comparado aos valores obtidos com a condição equilibrada. O trabalho indicou ainda que as maiores reduções de rendimento ocorrem quando se insere distorção harmônica nas condições com desequilíbrio de módulo e ângulo, e que o aumento no valor da distorção harmônica não culmina em reduções significativas para o conjugado e para o rendimento. Por fim, o trabalho verificou que os efeitos provocados pela presença simultânea do desequilíbrio e da distorção harmônica não correspondem à soma dos efeitos causados individualmente. Em média, a soma dos efeitos individuais é menor que o valor medido para o conjugado e para o rendimento submetidos aos fenômenos aplicados simultaneamente. Conclui-se que há uma grande probabilidade de as maiores atenuações no valor do conjugado e do rendimento ocorrerem quando há desequilíbrio e distorção simultaneamente.

O estudo experimental realizado em (Neves, 2014) avaliou os efeitos da aplicação conjunta de ambos os fenômenos sobre o conjugado e o rendimento da máquina. Esse trabalho obteve uma importante conclusão ao afirmar que o efeito sobre o motor da aplicação conjunta dos fenômenos é mais nocivo do que aquele verificado pela superposição da contribuição individual de cada um deles. No entanto, pelo fato de o trabalho não envolver resultados provenientes de simulações computacionais, um número limitado de condições de entrada foi considerado. Cabe ressaltar ainda que esse estudo não teve por objetivo a verificação da temperatura de operação do motor nessas condições.

(Santos, 2016) apresenta uma metodologia para se obter o valor estimado da potência no eixo dos motores de indução operando sob a presença de tensões desequilibradas e distorção harmônica. São mostrados os resultados da aplicação do *Bacterial Foraging Algorithm*, neste caso para se estimar a potência no eixo do motor, mediante a solução dos circuitos equivalentes correspondentes às análises de desequilíbrio e harmônicas. Ressalta o autor que a interação das harmônicas com o desequilíbrio de tensão resulta em uma combinação dos efeitos negativos de ambos os fenômenos no motor, ocasionando assim maiores perdas e a ocorrência de frequências pulsantes no conjugado. O modelo proposto foi validado experimentalmente em um MIT de 12,6 kW de potência nominal. Foram verificadas na rede, para 4 condições de carga distintas, casos contendo harmônicas de ordem 5 e 7, com intensidade de 4% e 1% respectivamente, em conjunto com desequilíbrios da ordem de 2% a 6%. Os mesmos valores foram simulados pelo método proposto e o erro encontrado foi inferior a 1,35%. Os autores verificaram que há grande variação entre as medições de níveis e ordens harmônicas na rede e sugerem que uma abordagem estatística seja considerada na análise desse fenômeno.

O trabalho de (Santos, 2015) por sua vez efetuou a análise do circuito equivalente do MIT, dimensionado por meio da aplicação do *Bacterial Foraging Algorithm*, neste caso com o objetivo de se obter o resultado para a eficiência do motor operando sob condições de desequilíbrio e distorção harmônica de tensão. Da mesma forma que em (Santos, 2016), as respostas da simulação foram comparadas àquelas obtidas em medições reais. O método se mostrou igualmente eficiente, com erro máximo de 1,35%.

Os trabalhos de (Santos, 2016) e (Santos, 2015) conseguiram realizar a modelagem do MIT operando sob desequilíbrio e distorção harmônica de tensão para a obtenção da potência de saída no eixo e eficiência do motor. As demais grandezas de desempenho da máquina tais como temperatura e conjugado não foram avaliadas nesses estudos. As condições de entrada para o modelo do motor se limitaram a 4 casos, após a escolha estatística da ocorrência dos fenômenos na rede.

(Donolo, 2016) estudou os efeitos da aplicação individual e conjunta de desequilíbrio de tensão e de distorção harmônica na potência instantânea, no conjugado e nas vibrações no eixo de máquinas de indução. O trabalho demonstrou que o desequilíbrio de tensão gera uma oscilação na potência na ordem de duas vezes a frequência de alimentação ocasionando maiores vibrações na máquina. Esse efeito cresce quase que linearmente em relação ao nível de desequilíbrio, atingindo 60% da potência nominal para um $FD\% = 5\%$. O desequilíbrio de tensão provoca um aumento significativo nas vibrações, podendo chegar a níveis onde a operação do motor se torna desaconselhável. Quanto às distorções harmônicas, foi demonstrado que a 5ª e a 7ª ordem produzem oscilações na potência ativa e no conjugado na ordem de 6 vezes a frequência da rede de alimentação. Da mesma forma, esse efeito cresce quase que linearmente com o nível de distorção, atingindo 80% da potência nominal para uma $DTT = 9\%$. Na análise dos efeitos conjuntos desses fenômenos, usando somente níveis aceitáveis de desequilíbrio e distorção harmônica, verificou-se níveis de vibrações no eixo fora do padrão recomendável. Finalmente, o estudo mostra que a potência instantânea e o conjugado são mais sensíveis a variações na distorção harmônica do que àquelas provocadas pelo desequilíbrio. O inverso ocorre quando da análise das vibrações no eixo, ou seja, esse parâmetro se mostrou mais sensível a variações no desequilíbrio do que a variações na distorção harmônica de tensão.

O trabalho de (Donolo, 2016) realizou a análise de ocorrência simultânea e individual de desequilíbrio e distorção harmônica no MIT, introduzindo um modelo matemático e validando os resultados em ensaios laboratoriais. Este estudo verificou os efeitos desses fenômenos no motor analisando a potência instantânea, conjugado e vibrações no eixo. A variação da temperatura na máquina não foi objeto de avaliação dessa publicação. As condições avaliadas foram pontuais, se resumindo a aplicação da 5ª e 7ª harmônicas e condições de desequilíbrio variando de $FD\% = 3\%$ a $FD\% = 7\%$.

(Gnacinski, 2008a) investiga a influência do ângulo do CVUF no aumento da temperatura dos enrolamentos de MIT submetido a tensões desequilibradas. O autor analisa ainda o efeito conjunto da aplicação de desequilíbrio e harmônicas no motor. É apresentada uma modelagem matemática detalhada para descrever as perdas e o conjugado dos motores de indução submetidos a ambos os distúrbios. Os ensaios experimentais do trabalho foram realizados com motores de 3 kW e 5,5 kW a plena carga, alimentados por uma fonte controlável. Os resultados mostraram que a variação da temperatura possui um comportamento senoidal em relação ao ângulo do CVUF da tensão trifásica aplicada. A diferença de temperatura verificada em relação ao ângulo do CVUF variou senoidalmente entre -5K e +9K em relação à temperatura nominal. Ressalta-se que as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor são proporcionais ao quadrado do percentual do desequilíbrio, no entanto, os resultados obtidos experimentalmente, bem como aqueles calculados, evidenciaram que, especialmente para os piores casos, essa dependência é linear. O trabalho indica que motores submetidos a desequilíbrio de tensão não podem operar com sua carga nominal e devem sofrer um fator de *derating* para que não ocorra sobreaquecimento dos enrolamentos. Quanto à aplicação conjunta de desequilíbrio e harmônicas, foi empregado experimentalmente somente uma condição, sendo ela com VUF = 2% e DTT = 6%, contendo as harmônicas de ordem 5, 7, 11 e 13 no mesmo sinal. Conclui-se que o efeito do ângulo do CVUF é mais significativo na variação da temperatura do que aquele causado pela presença da distorção harmônica nesse caso estudado. Por fim, o trabalho mostra por meio de um gráfico o resultado de um cálculo que relaciona o fator de desequilíbrio VUF, a intensidade das harmônicas DTT e a redução da vida útil dos motores de indução. A título de exemplo, para um VUF = 3%, sem a presença de harmônicas, o trabalho indica que a vida útil do motor se reduz a 61% da original. Quando é inserida uma distorção harmônica com DTT = 8% nessa condição, a vida útil do motor cai a 54%.

O trabalho de (Gnacinski, 2008a) mostrou resultados relevantes ao relacionar graficamente a vida útil do motor de indução em função do desequilíbrio e da distorção harmônica aplicados simultaneamente. No entanto, os casos estudados desse segundo fenômeno se limitaram a variações de intensidade para uma mesma combinação de ordens harmônicas. Ainda, não foi efetuada uma validação experimental do modelo utilizado para os cálculos que resultaram no gráfico apresentado, uma vez que somente uma condição de aplicação simultânea dos fenômenos foi ensaiada em laboratório.

(Duarte, 2010) expõe um método de obtenção dos parâmetros relacionados a desequilíbrio de tensão e distorção harmônica no MIT baseado na representação instantânea no eixo dq e na norma euclidiana instantânea. O autor propõe um novo índice de qualidade de energia para mensurar como a combinação de ambos os fenômenos afeta o aumento da temperatura e a consequente redução de vida útil do motor. O autor realizou testes em laboratório, em um MIT de 1 HP com uma carga mecânica, envolvendo uma combinação de condições de alimentação com desequilíbrio e harmônicas simultaneamente. Em relação ao desequilíbrio, o $FD\%$ aplicado foi de 3% e 5%. Para as harmônicas foram consideradas as ordens $h = 3, 5, 7$ e 11 , com magnitudes iguais a 5%, 10% e 15%. Para a aplicação de somente desequilíbrio de tensão, foi observado um aumento de aproximadamente $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para cada incremento de 1% no desequilíbrio. Quando da aplicação de somente distorção harmônica de tensão, o autor verificou que quanto maior a ordem harmônica aplicada, menor foi o aumento na temperatura do motor. Observou-se ainda que o aumento na temperatura causado por harmônicas de sequência negativa ($2^{\text{a}}, 5^{\text{a}}, \dots$) não foi significativamente superior àqueles causados por harmônicas de sequência positiva ($4^{\text{a}}, 7^{\text{a}}, \dots$). Foi verificado que a aplicação de harmônicas desequilibradas tem efeito menos significativo na temperatura em comparação à aplicação de harmônicas equilibradas. Ao se realizar o teste com harmônicas equilibradas e desequilíbrio na frequência fundamental, o trabalho mostrou que o aumento na temperatura foi $2/3$ superior àquele verificado quando da aplicação de harmônicas equilibradas somente. Por fim, ao se aplicar desequilíbrio na frequência fundamental e desequilíbrio nas harmônicas, foi observado um aumento de temperatura superior ao obtido para todos os casos anteriores.

(Duarte, 2010) procedeu ensaios em laboratório para uma série de condições envolvendo desequilíbrio de tensão e distorção harmônica simultaneamente, realizando o monitoramento da temperatura de operação. O seu objetivo foi a proposição de um índice de qualidade de energia capaz de representar os efeitos danosos que ambos os fenômenos aplicados concomitantemente no motor provocam na sua temperatura de operação. O trabalho de (Duarte, 2010) se aproxima da proposta desta dissertação, porém, limitou a análise dos efeitos no motor a um número restrito de condições em laboratório, o que foi suficiente para os objetivos propostos pelo autor. Não foram realizados, no entanto, ensaios em laboratório ou simulações computacionais com um número mais abrangente de condições de alimentação do motor, de forma a se evidenciar os efeitos da aplicação conjunta desses

fenômenos para uma quantidade maior de ordens harmônicas e diferentes níveis de desequilíbrio.

(Abreu, 2002) explorou os efeitos das distorções harmônicas e do desequilíbrio na redução da vida útil de motores de indução de baixa tensão. O autor desenvolveu um modelo matemático capaz de representar a variação térmica dos enrolamentos submetidos aos fenômenos mencionados. O modelo leva em consideração as perdas no entreferro e nos enrolamentos do estator e rotor, bem como perdas pulsantes e na superfície. O trabalho realizou as simulações para 5 modelos diferentes de MIT, todos com isolamento classe F e potências nominais de 2, 10, 30, 100 e 200 HP, operando com 75% da sua carga. Os resultados mostraram que não há uma relação simples entre desequilíbrio e distorção harmônica, perda de vida útil e potência nominal da máquina. Como exemplo, o estudo mostrou que para um desequilíbrio de 1% e distorção harmônica de ordem 5 com diferentes intensidades, os efeitos negativos no motor de 100 HP superou todos os demais, seguido pelo motor de 10 HP, em perda de vida útil, o que evidencia a inexistência de uma relação clara entre a potência nominal do motor e esses fenômenos. O autor então apresenta de forma tabelada os resultados encontrados para os casos simulados. Foram considerados sinais contendo harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11, e 13, com intensidades de 3%, 6% e 9%, associadas a desequilíbrio de 1% e 2%. Os resultados mostraram que, para uma vida útil estimada de 20 anos, a operação com somente desequilíbrio de 1% reduz esse tempo de 0,59 a 1,21 anos. Quando o desequilíbrio atinge 2%, a redução da vida útil quadruplica e chega a 4,44 anos. Quando o desequilíbrio de 1% é combinado ao sinal de harmônicas com DTT = 3%, a redução na vida útil vai de 0,99 a 2,25 anos. Nessa situação, se o desequilíbrio subir a 2%, a redução na vida útil vai de 2,63 a 5,30 anos. Percebe-se uma redução considerável na vida útil do motor submetido a ambos os fenômenos simultaneamente. O trabalho então realiza uma estimativa das perdas econômicas causadas pela operação do motor nessas condições nos Estados Unidos da América. Para um desequilíbrio de 2% combinado com distorção harmônica de 5%, a perda financeira anual estimada é de 1,8 bilhão de dólares. Conclui-se que a operação do MIT sob desequilíbrio de tensão e distorção harmônica pode ser responsável por perdas financeiras significativas, e o resultado apresentado deve ser levado em consideração por engenheiros responsáveis pela elaboração de normas e recomendações para a operação de motores.

O modelo desenvolvido por (Abreu, 2002) apresentou resultados para o desempenho do MIT submetido a desequilíbrio e distorção harmônica de tensão simultaneamente. No entanto, os resultados apresentados, embora envolvam valores de redução da vida útil do motor, tiveram um enfoque nas perdas financeiras causadas por esses fenômenos. Não são apresentados neste artigo os resultados absolutos obtidos para a temperatura do MIT em questão. Os casos avaliados pelo autor envolveram duas condições de desequilíbrio associadas a 5 diferentes ordens harmônicas. Não foram avaliados os efeitos de harmônicas de ordem par.

Após a apresentação desses trabalhos, nota-se que os efeitos do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica sobre a operação do motor de indução se mostra um tema pertinente e atual, sendo objeto de diversas pesquisas e publicações relevantes. O levantamento do Estado da Arte abordado neste tópico mostrou, no entanto, que existem ainda certos pontos passíveis de exploração em novas pesquisas. Os efeitos individuais do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica no motor, bem como a modelagem elétrica e térmica para cada um deles, encontram-se consolidados entre as publicações ao longo dos anos. Porém, nos trabalhos que realizaram a avaliação dos efeitos conjuntos desses fenômenos na temperatura de operação do MIT, a quantidade de condições analisadas se mostra restrita, não sendo possível assim avaliar de forma mais abrangente o comportamento da máquina submetida a um número maior de condições de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, aplicadas individualmente e simultaneamente.

1.3 - OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Os trabalhos (Abreu, 2002), (Gnacinski, 2008a) e (Duarte, 2010) exploram os efeitos na temperatura e na redução da vida útil do MIT quando alimentado por tensões desequilibradas e com distorções harmônicas simultaneamente. No entanto, os resultados analisados por esses autores, sejam eles provenientes de ensaios em laboratório ou de simulações computacionais, abordam uma quantidade limitada de condições para esses distúrbios de QEE. Dessa forma, é possível identificar na literatura espaço para um trabalho que se proponha a avaliar os efeitos na temperatura de operação do MIT quando submetido a uma quantidade ampla de condições combinadas de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, possibilitando a obtenção de uma representação do comportamento da máquina sob diferentes variações desses dois distúrbios ocorrendo de forma individual e simultânea.

Os aspectos ora mencionados constituem um plano de fundo para o início do desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo geral é avaliar a variação da temperatura de operação do MIT quando da sua submissão a variados níveis de desequilíbrios de tensão e de distorção harmônica, aplicados individualmente e concomitantemente. Para tanto, os objetivos específicos são:

- Elaborar critérios objetivos para a escolha dos valores de tensões desequilibradas e contendo distorção harmônica que irão compor os bancos de dados a serem ensaiados em laboratório, bem como aqueles que serão posteriormente utilizados nas simulações computacionais;
- Identificar, por meio de ensaios em laboratório, os valores da temperatura de um MIT submetido a um conjunto de condições de alimentação contendo Desequilíbrio de Tensão e Distorção Harmônica, aplicados individualmente e conjuntamente;
- Identificar, com base nos resultados dos ensaios e por meio de técnicas computacionais de otimização, um conjunto de parâmetros para um modelo térmico computacional que possibilite a representação com fidelidade do comportamento da temperatura desse MIT quando da sua submissão a um conjunto de condições com Desequilíbrio de Tensão e Distorção Harmônica, aplicados individualmente e conjuntamente;
- Fazer uso de um modelo térmico computacional para estimação das temperaturas nas três fases dos enrolamentos do estator do MIT submetido aos distúrbios de QEE supramencionados;
- Analisar e comparar os efeitos na temperatura de operação dos enrolamentos do estator de um MIT submetido a uma alimentação sujeita a diferentes níveis de Desequilíbrio de Tensão e de Distorção Harmônica; e,
- Avaliar a adequabilidade de índices de QEE constantes nos dispositivos normativos vigentes, nacionais e internacionais, afim de se verificar o funcionamento da máquina quando da sua operação submetida a níveis individuais de desequilíbrio e harmônicas

dentro dos padrões recomendados, porém em situações de ocorrência simultânea desses distúrbios.

1.4 – CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Dentre as principais contribuições deste trabalho destacam-se:

- Emprego de uma metodologia para a elaboração e validação de um modelo computacional capaz de representar o comportamento da temperatura de um MIT submetido a alimentação contendo desequilíbrio de tensão e distorção harmônica aplicados individualmente e conjuntamente; e,
- Estudo do comportamento da temperatura de um MIT, resultado de uma quantidade variada de condições de entrada para valores de tensão contendo desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, aplicados individualmente e conjuntamente à máquina.

1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De forma a se cumprir com a proposta descrita nos objetivos descritos, esta dissertação é estruturada nos seguintes capítulos:

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica relacionada aos distúrbios de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, discorrendo sobre suas conceituações, causas e efeitos, métodos de quantificação e limites normativos mais relevantes. Em seguida, é descrita fundamentação necessária à elaboração da modelagem térmica do MIT que será empregada no desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 3 é direcionado à infraestrutura e aos métodos adotados para se concretizar os objetivos dessa dissertação. Apresenta-se a estrutura laboratorial e os bancos de dados contendo as condições de desequilíbrios e harmônicas a que o MIT é submetido. O capítulo aborda ainda a definição da modelagem térmica computacional utilizada ao longo do trabalho e descreve a metodologia utilizada para a sua validação em laboratório e para a análise dos resultados obtidos.

No Capítulo 4, são expostos e discutidos os resultados obtidos neste estudo, ocasião onde são exibidos os dados provenientes do modelo computacional e realizadas as análises pertinentes. Esse capítulo descreve o comportamento da temperatura de operação do MIT quando submetido aos fenômenos estudados, individualmente e concomitantemente. É considerado um estudo de caso específico onde são analisados resultados para condições individualmente dentro dos valores normativos e os efeitos provenientes da sua aplicação combinada. Ao final, o capítulo realiza a comparação dos resultados provenientes de duas propostas de indicadores que ponderam a influência do desequilíbrio e da distorção harmônica no seu cálculo.

O Capítulo 5 destina-se a apresentar as principais conclusões desta dissertação. Por fim, com base nos resultados obtidos, são pontuadas sugestões para pesquisas futuras que poderão contribuir com esta linha de trabalho.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O trabalho (Souto, 2001) ressalta que dentre os diversos itens que definem uma rede com qualidade comprometida, as distorções harmônicas e, principalmente, os desequilíbrios nas tensões, particularmente no que se refere à máquina de indução, constituem-se nos distúrbios mais prejudiciais ao desempenho das máquinas elétricas. Esses fenômenos representam desvios de Qualidade da Energia comumente verificados nas redes de alimentação do sistema elétrico (Jesus, 2007).

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica acerca dos mencionados distúrbios, abordando seus conceitos, causas, efeitos nos equipamentos elétricos e as suas metodologias de quantificação, bem como os principais limites regulatórios nacionais e internacionais vigentes. Posteriormente, é apresentada a fundamentação de modelagem térmica do motor de indução que será considerada nesta dissertação para que sejam alcançados os objetivos traçados. Serão então listadas e descritas as publicações mais relevantes cujo tema possua relação direta com a proposta deste trabalho, compondo o Estado da Arte. Por fim, são apresentadas as contribuições trazidas por esta pesquisa e as considerações finais do capítulo.

2.2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Neste item, são apresentados os tópicos de fundamentação teórica relacionados ao desequilíbrio de tensão, discorrendo sobre a sua definição, causas e efeitos nos equipamentos elétricos. Posteriormente, são descritos os métodos de cálculo desse distúrbio e seus limites normativos.

2.2.1 – Definição

Em um sistema trifásico ideal as fases devem possuir mesmo módulo e serem defasadas 120° entre si. Entretanto, observa-se na realidade a ocorrência tanto de divergências entre os módulos das fases, quanto na defasagem angular, caracterizando o fenômeno do desequilíbrio de tensão. O desequilíbrio de tensão é um distúrbio de QEE frequentemente

encontrado nas redes de distribuição de energia, tendo por causa mais comum a má distribuição de cargas monofásicas entre as fases.

2.2.2 – Causas e Efeitos

Além da mencionada má distribuição de cargas entre as fases, outras causas conhecidas para a ocorrência do desequilíbrio de tensão nas redes de fornecimento de energia são (Ferreira Filho, 2008):

- Impedâncias distintas entre os enrolamentos do transformador;
- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Falhas em bancos de capacitores, como o rompimento do fusível de uma das fases;
- Motores elétricos trifásicos com impedâncias desequilibradas;
- Desigualdade nas impedâncias das linhas de transmissão;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico; e
- Fenômenos como interrupções, subtensões, sobretensões, afundamentos, dentre outros.

O desequilíbrio das tensões provoca diversas ocorrências nas instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais, das quais se destacam (Lee, 1999) (Ferreira Filho, 2008):

- Surgimento de correntes de sequência negativa;
- Desperdício de energia devido à existência de maiores perdas provocadas por altas correntes desequilibradas (redução de rendimento);
- Elevação da temperatura dos enrolamentos acima dos limites aceitáveis por motores e demais máquinas elétricas, culminando em perda de vida útil desses equipamentos;
- Redução do conjugado disponível para a carga, pela existência de componente de campo magnético girante em sentido contrário ao da rotação do motor.

2.2.3 – Métodos de Quantificação

Dentre os diferentes métodos de quantificação reconhecidos e difundidos internacionalmente para o desequilíbrio de tensão, destacam-se quatro: (i) Método das Componentes Simétricas, (ii) CIGRÉ, (iii) NEMA e (iv) IEEE (Beneteli, 2015). As metodologias NEMA e IEEE trabalham unicamente com módulos dos valores de tensão, sendo esse um fato positivo dado que vários medidores utilizados na prática apresentam restrições para a obtenção das grandezas angulares. Já o método de componentes simétricas se baseia no Teorema de *Fortescue*, que decompõe o sistema trifásico em três sistemas equilibrados e demanda o conhecimento tanto dos módulos quanto dos ângulos das tensões de fase. O método CIGRÉ fornece resultados bem próximos àqueles resultantes do método das componentes simétricas, porém, a forma de cálculo é diferente na medida em que utiliza somente o valor dos módulos das tensões de linha do sistema. A seguir as metodologias mencionadas serão descritas em detalhes.

2.2.3.1 – Método das Componentes Simétricas

O método das componentes simétricas é fundamentado na decomposição dos fasores desequilibrados em três subsistemas equilibrados. Os subsistemas resultantes são formados por:

- Componentes de tensão de sequência positiva;
- Componentes de tensão de sequência negativa; e
- Componentes de tensão de sequência zero.

As componentes simétricas de um conjunto de tensões trifásicas desequilibrado são encontradas com a utilização da Matriz de *Fortescue*, conforme apresentado na equação (2.1):

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle -120^\circ \\ 1 & 1\angle -120^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Onde:

- $\bar{V}_0 = V_0 \angle \theta_0$ é o fasor da componente de tensão de sequência zero;
 $\bar{V}_1 = V_1 \angle 0^\circ$ é o fasor da componente de tensão de sequência positiva;
 $\bar{V}_2 = V_2 \angle \theta_2$ é o fasor da componente de tensão de sequência negativa;
 $\bar{V}_A = V_A \angle \theta_A$ é a tensão na fase A;
 $\bar{V}_B = V_B \angle \theta_B$ é a tensão na fase B;
 $\bar{V}_C = V_C \angle \theta_C$ é a tensão na fase C.

Uma vez obtidos os valores referentes às componentes de sequência de um sistema trifásico desequilibrado, o Fator de Desequilíbrio pode ser definido por meio da equação (2.2) (ANEEL, 2017):

$$FD_{\%} = |\bar{V}_2 / \bar{V}_1| = V_2 / V_1 \quad (2.2)$$

Onde:

- $FD_{\%}$ é o Fator de Desequilíbrio de tensão;
 V_2 é a magnitude do valor eficaz da tensão de sequência negativa; e
 V_1 é a magnitude do valor eficaz da tensão de sequência positiva.

Na aplicação desse método de quantificação do desequilíbrio a utilização de tensões de linha ou de fase resulta no mesmo valor final para o indicador.

O Fator de Desequilíbrio calculado segundo a equação (2.2) recebe também a denominação de *Negative Voltage Unbalance Factor*, ou VUF_2 . De maneira análoga, é possível calcular a representatividade da componente de sequência zero frente à componente de sequência positiva, resultando no fator de desequilíbrio de tensão de sequência zero (*Zero Voltage Unbalance Factor*) VUF_0 , conforme apresentado pela equação (2.3).

$$VUF_0 = |\bar{V}_0 / \bar{V}_1| = V_0 / V_1 \quad (2.3)$$

2.2.3.2 – Método CIGRÉ

Neste método, descrito pelas equações (2.4) e (2.5), somente os módulos das tensões de linha são empregados. A necessidade do seu uso advém das restrições apresentadas por alguns aparelhos na realização de medições dos ângulos das tensões de fase.

$$FD_{\%} = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (2.5)$$

Onde:

V_{AB} - módulo da tensão de linha entre as fases A e B;

V_{BC} - módulo da tensão de linha entre as fases B e C;

V_{CA} - módulo da tensão de linha entre as fases C e A.

2.2.3.3 – Método NEMA

A quantificação do desequilíbrio apresentada na norma NEMA MG1 (NEMA, 1987) emprega os valores das tensões de linha. O método define o LVUR (*Line Voltage Unbalance Rate*) como a razão entre o máximo desvio das tensões de linha em relação ao seu valor médio. A equação (2.6) mostra o cálculo LVUR trabalhado nessa metodologia.

$$LVUR = \frac{\Delta V_{L,Max}}{\Delta V_{L,Médio}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Onde:

$LVUR$ é a razão de desequilíbrio de tensão de linha (*Line Voltage Unbalance Rate*);

$\Delta V_{L,Max}$ é a máxima diferença entre as tensões de linha medidas e $\Delta V_{L,Médio}$;

$\Delta V_{L,Médio}$ é a média das tensões de linha. (Pela definição do NEMA/ANSI MG1-1993 assume-se que a tensão média é igual à tensão nominal).

De acordo com a norma IEEE 1159-2009, o método de cálculo do LVUR resulta em valores próximos aos apresentados pelo método das componentes simétricas nos casos em que sejam utilizadas tensões de linha, o conteúdo harmônico do sinal seja baixo e a componente de sequência zero seja pequena.

2.2.3.4 – Método IEEE

Este método quantifica o Fator de Desequilíbrio pela razão entre a diferença do maior e menor valor das tensões de fase e o somatório dos valores de tensão, na forma apresentada pela equação (2.10). Diferentemente do método NEMA, a metodologia IEEE leva em conta o máximo desvio entre as tensões.

$$FD_{\%} = \frac{3 \cdot (V_{Max} - V_{Min})}{V_A + V_B + V_C} \times 100\% \quad (2.7)$$

Onde:

$FD_{\%}$ é o fator de Desequilíbrio calculado pelo método IEEE

V_{Max} é o valor máximo das tensões de fase;

V_{Min} é o valor mínimo das tensões de fase;

V_A, V_B e V_C é o valores das tensões de fase nas fases A, B e C.

As normas IEEE 141-1993 e IEEE 1159-1995 sugerem também o valor do indicador obtido pelo método das componentes simétricas. A partir de 2009, com a edição da norma 1159-2009, o IEEE adotou os cálculos propostos pela metodologia CIGRÉ e pelo método das componentes simétricas.

2.2.4 – Limites Normativos para o Desequilíbrio de Tensão

Uma vez ilustrados os métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão, este tópico tem o objetivo de apresentar os limites estabelecidos pelos dispositivos normativos mais relevantes para os indicadores desse distúrbio, considerando-se a operação em sistemas elétricos de baixa tensão com tensão nominal menor ou igual a 1 kV.

2.2.4.1 – IEC 61000

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização mundial para normatização composta por todos os comitês nacionais (*IEC National Committees*). O objetivo da IEC é promover a cooperação internacional em todas as questões que envolvem padronização nas áreas elétrica e eletrônica.

Os padrões indicados pelos documentos normativos da família IEC 61000 são adotados pelo *European Committee for Electrotechnical Standardization* (Cenelec), sendo requisito para a venda de produtos nesse continente e também em alguns outros países sob influência europeia.

A norma IEC 61000-4-30, cuja revisão mais atual foi publicada em 2015, define os métodos para medição e interpretação de resultados para parâmetros de Qualidade da Energia em sistemas de alimentação com frequência fundamental declarada de 50 Hz ou 60 Hz. Segundo essa norma, deve ser priorizado o emprego do método de cálculo das componentes simétricas ou do método CIGRÉ.

Por sua vez, a IEC 61000-2-2 recomenda que, em sistemas de baixa tensão, o VUF_2 ($FD_{\%}$) não ultrapasse o limite de 2%. Em alguns casos, valores elevados podem ocorrer por períodos limitados, por exemplo, durante um curto-circuito (Almeida, 2013).

2.2.4.2 – IEEE 1159-2009

A IEEE 1159-2009, assim como demais documentos normativos do IEEE contendo valores padrão para indicadores de QEE em sistemas elétricos, é desenvolvida dentro das Sociedades do IEEE e dos Comitês de Coordenação de Padrões do *IEEE Standards Association* (IEEE-

SA). Os padrões estabelecidos por esse dispositivo normativo são indicativos, de forma que cabe ao usuário seguir voluntariamente os limites apresentados.

Segundo esse documento, o Fator de Desequilíbrio deve ser calculado baseado no método das componentes simétricas ou no método CIGRÉ. O limite indicado para o índice de desequilíbrio é de 2%, sendo desejável um valor menor que 1%.

2.2.4.3 – ANSI C84.1-2016

A *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) representa quase 350 fabricantes de equipamentos elétricos e de geração de imagens médicas nos Estados Unidos.

A norma ANSI C84.1-2016, publicada por essa Associação, define classificações de tensão nominal e tolerâncias de operação para sistemas de energia elétrica de 60 Hz em níveis acima de 100 V. Esse dispositivo normativo recomenda que os sistemas elétricos sejam projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3%, obtidos por meio do método de quantificação NEMA.

2.2.4.4 – PRODIST

A ANEEL, em conjunto com representantes do setor elétrico, elaborou um conjunto de diretrizes denominado “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST” com a intenção de centralizar todos os aspectos de regulação a serem seguidos pelas empresas concessionárias e permissionárias de serviços de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2011).

O Módulo 8 da citada norma indica os métodos das componentes simétricas e do CIGRÉ para a quantificação do desequilíbrio. O limite estabelecido por esse dispositivo dispõe que o valor do $FD\%$ nos barramentos do sistema de distribuição de baixa tensão (menor ou igual a 1 kV) deve ser igual ou inferior a 3 %. Ainda, obedecido o supramencionado valor limite para o desequilíbrio, a norma considera adequada a operação de sistemas de baixa tensão, cuja tensão nominal de fase seja igual a 127 V, dentro do intervalo de 117 V a 133 V.

2.3 – DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

Neste item são apresentados os tópicos de fundamentação teórica relacionados ao fenômeno da distorção harmônica de tensão, discorrendo sobre a sua definição, as causas, os efeitos nos equipamentos elétricos, os métodos de cálculo desse distúrbio e os limites normativos vigentes.

2.3.1 – Definição

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2017). Embora distorcida, a tensão de alimentação é periódica e, portanto, pode ser decomposta por meio da Série de Fourier em uma sequência infinita de ondas senoidais com diferentes valores de frequência. Essas diferentes frequências, quando múltiplas da fundamental, são denominadas ordens harmônicas. A Figura 2.1 mostra um exemplo da mencionada decomposição aplicada a um sinal de corrente elétrica com a presença de distorção harmônica.

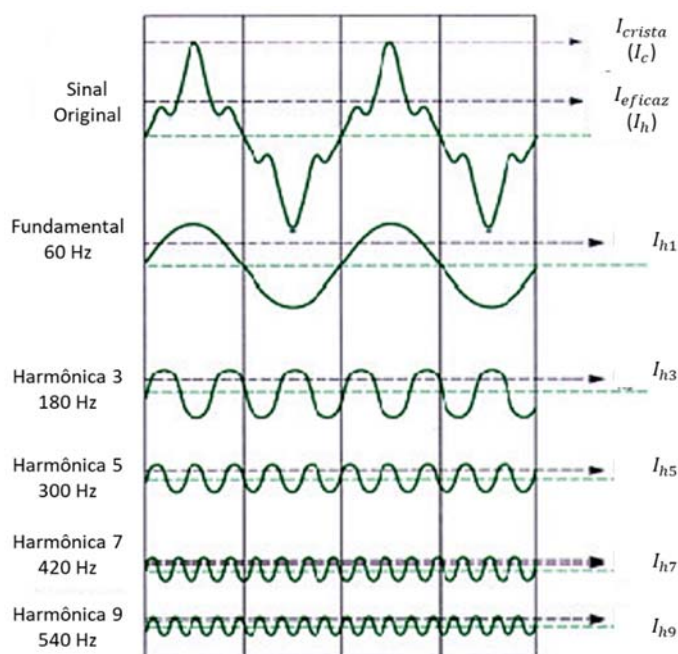


Figura 2.1 – Exemplo de onda distorcida decomposta por meio da Série de Fourier (Chapman, 2005).

Um sinal decomposto por meio da Série de Fourier será expresso matematicamente de acordo com a equação (2.8), e a corrente como a equação (2.9).

$$v(t) = V_{cc} + V_f \text{sen}(\omega_0 t) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_0 t + \Phi_h) \quad (2.8)$$

$$i(t) = I_{cc} + I_f \text{sen}(\omega_0 t) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (2.9)$$

Onde:

V_{cc} e I_{cc}	são as parcelas CC das grandezas tensão e corrente, respectivamente
V_f e I_f	são os módulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência fundamental;
h	é a ordem harmônica;
ω_0	é a frequência angular fundamental
V_h e I_h	são os módulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica h ;
Φ_h e θ_h	são os ângulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica h .

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem (pares ou ímpares) e quanto à sequência (positiva, negativa ou zero). Quanto à classificação pela sua ordem, as harmônicas ímpares são frequentes nas instalações elétricas em geral, enquanto que as de ordem par ocorrem nos casos de haver assimetrias do sinal pela presença da componente contínua (Neto, 2012).

Para classificação quanto à sequência, em um sistema trifásico equilibrado as componentes podem ser divididas em harmônicas de sequência positiva, negativa e zero. Considerando $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, podem ser observadas as seguintes características nos sinais distorcidos:

- i. Harmônicas de ordem $h = 3k + 1$ são denominadas de sequência positiva;
- ii. Harmônicas de ordem $h = 3k + 2$ são denominadas de sequência negativa; e
- iii. Harmônicas de ordem $h = 3k + 3$, chamadas harmônicas triplas, são denominadas de sequência zero.

2.3.2 – Causas e Efeitos

A causa mais significativa para a ocorrência de distorções harmônicas de tensão e corrente na rede elétrica é o uso crescente de cargas não-lineares. Esse tipo de carga, que representava somente 15% da demanda total de energia elétrica em 1987, atingiu a marca de 70% da demanda na década de 2000. A consequência vem sendo verificada ao longo do tempo nos dados de monitoramento da rede elétrica, evidenciando a ocorrência crescente desse fenômeno (Radmehr, 2006). Uma carga é considerada não linear quando a sua corrente não é diretamente proporcional a sua tensão instantânea.

Nos sistemas de distribuição, as cargas não lineares absorvem da fonte correntes não senoidais, as quais podem distorcer a tensão devido à interação com a impedância equivalente da rede estabelecida antes da barra da carga. Exemplos típicos de cargas não lineares incluem grande parte dos equipamentos largamente utilizados em residências e comércio, tais como TV, computadores, impressoras e lâmpadas de descarga. Nos sistemas elétricos industriais, cargas elétricas destinadas ao acionamento de motores e a unidades de alimentação ininterruptas de energia (UPS), tais como conversores estáticos e equipamentos com elemento saturado, encontrados sobretudo em parques siderúrgicos, são aquelas com maior impacto na forma de onda da tensão de alimentação. Os equipamentos, ainda que lineares, supridos por um barramento com distorção harmônica de tensão sofrem efeitos danosos e seu desempenho pode ser afetado por esse fenômeno de QEE (Brito, 2006) (Rodrigues, 2009).

Os efeitos resultantes da presença de distorções harmônicas na rede de alimentação são diretamente relacionados à sequência da harmônica: positiva, negativa ou zero. Quanto à operação de motores de indução submetidos a esse distúrbio, é sabido que harmônicas de sequência positiva aceleram o eixo, enquanto as de sequência negativa realizam força contrária ao sentido do torque, contribuindo para a sua frenagem. Tal fato resulta em oscilação de conjugado e em uma tendência do motor em não fornecer um conjugado constante para a carga. Essa ocorrência aumenta o nível de vibração do eixo, acelerando o seu processo de fadiga. Além disso, há o aumento do ruído audível da máquina quando comparado àquele verificado em um motor submetido a uma alimentação nominal puramente senoidal. As harmônicas de sequência zero não influenciam o conjugado da

máquina, no entanto, todas as harmônicas influenciam no aumento da temperatura de operação dos seus enrolamentos (Abreu, 2002) (Neves, 2014).

2.3.3 – Métodos de Quantificação

Para a quantificação das distorções harmônicas presentes em um sinal de tensão, são avaliadas as contribuições individuais de cada ordem harmônica (distorção harmônica individual de tensão de ordem h - $DIT_h\%$) e a contribuição total de todas as ordens conjuntamente (Distorção harmônica total de tensão - $DTT\%$), conforme descrito pelas expressões (2.10) e (2.11), respectivamente.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.10)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

Onde:

- V_h é a tensão harmônica de ordem h ;
- V_1 é a tensão fundamental medida;
- $hm\acute{a}x$ é a ordem da máxima harmônica considerada.

Expressões análogas à (2.10) e (2.11) podem ser obtidas para a quantificação da distorção harmônica em sinais distorcidos de corrente elétrica.

2.3.4 – Limites Normativos para a Distorção Harmônica de Tensão

Após a descrição do método de quantificação para o fenômeno da distorção harmônica de tensão, este tópico tem o objetivo de apresentar os limites estabelecidos pelos dispositivos normativos mais relevantes para os indicadores desse distúrbio, considerando-se a operação em sistemas elétricos de baixa tensão com tensão nominal menor ou igual a 1 kV.

2.3.4.1 – IEEE–519–1992

Desenvolvida junto aos Comitês Técnicos do IEEE, esse documento apresenta práticas e requisitos para o controle de harmônicas no sistema elétrico de potência. Os limites para esse fenômeno em sistemas de baixa tensão são indicados na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal

Tensão Nominal	Distorção Harmônica de Tensão Individual (DIT_h%)	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT%)
$V_N \leq 69 \text{ kV}$	3	5

2.3.4.2 – IEC 61000

A norma IEC 61000–3–6 indica que o consumidor deve se responsabilizar em manter os níveis de emissão de harmônicos dentro dos limites estabelecidos pela concessionária. Em contrapartida, atribui à distribuidora a responsabilidade pelo controle global dos níveis do distúrbio sob condições normais de operação. Acrescenta que o consumidor e a concessionária de distribuição devem cooperar quando necessário na identificação do método ótimo para reduzir as emissões de harmônicos.

Já a IEC 61000–2–2 trata dos distúrbios de baixa frequência (0 kHz a 9 kHz) tais como níveis harmônicos em redes de baixa tensão, monofásicas (até 420V) e trifásicas (até 690 V).

Os limites apresentados como referência por essas normas se relacionam a tensões harmônicas individuais, de forma que o valor máximo admitido para o distúrbio varia de acordo com a ordem harmônica verificada. Uma distorção harmônica total máxima é também definida. A Tabela 2.2 apresenta os limites especificados por estes documentos normativos.

Tabela 2.2 - Limites de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) impostos pelas normas IEC 61000–2–2. e IEC 61000–3–6.

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem h	$DIT_h\%$	Ordem h	$DIT_h\%$	Ordem h	$DIT_h\%$
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5

2.3.4.3 – PRODIST

O Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017) calcula valores de $DTT\%$ divididos em quatro grupos distintos: (i) $DTT\%_p$, considerando somente a contribuição das harmônicas de ordem par não múltiplas de 3, (ii) $DTT\%_i$, considerando somente a contribuição das harmônicas de ordem ímpar não múltiplas de 3, (iii) $DTT\%_3$, considerando somente a contribuição das harmônicas múltiplas de 3 e (iv) $DTT\%$, considerando a contribuição de todas as ordens harmônicas. A Tabela 2.3 apresenta os limites das distorções harmônicas totais impostos pelo PRODIST para valores de tensão nominal inferiores a 1 kV.

Tabela 2.3 - Limites das distorções harmônicas totais impostos pelo PRODIST para tensão nominal (V_n) menor ou igual a 1 kV (em % da tensão fundamental).

Indicador	$V_n \leq 1kV$
$DTT\%_p$	2,5%
$DTT\%_i$	7,5%
$DTT\%_3$	6,5%
$DTT\%$	10%

2.4 – MODELAGEM TÉRMICA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O contexto apresentado pelos itens anteriores mostra que a operação de um motor de indução sob condições não ideais de suprimento pode resultar em majoração das perdas e subsequentes impactos sobre a sua temperatura e sua vida útil. Dessa forma, dentro dos objetivos traçados para o trabalho, surge a necessidade de maiores investigações sobre a

elevação da temperatura da máquina operando sob tais condições. Este tópico irá apresentar uma breve fundamentação relacionada à modelagem térmica do motor de indução trifásico utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Modelos térmicos podem ser desenvolvidos com base em duas metodologias. Uma delas se baseia na utilização de técnicas numéricas como o método de diferenças finitas ou elementos finitos. Esse método se mostra eficiente para representar a transferência de calor por condução, no entanto, a modelagem de transferência por convecção e radiação se torna mais difícil. Além disso, pode ser complexa a verificação de eventuais diferenças nos parâmetros de projeto da máquina. Uma segunda metodologia considerada para a modelagem térmica do MIT consiste no uso de modelos de parâmetros concentrados e é realizada dividindo a máquina em vários elementos, cada um dos quais identificado como um nó contendo capacitância térmica e fonte de calor, interligados por meio de condutâncias térmicas. O resultado é a formação de uma rede térmica equivalente (Chowdhury e Baski, 2010).

Em relação à modelagem térmica do motor pelo método dos elementos finitos, é possível mapear a distribuição de temperatura ao longo do corpo e, com isso, conhecer os pontos mais quentes. Por outro lado, no modelo a parâmetros concentrados, cada ponto de interesse da máquina é representado por parâmetros térmicos apropriados e a temperatura obtida traduz um valor médio e não valores pontuais (Souto, 2001).

Apesar de o emprego da metodologia dos elementos finitos representar de forma mais fiel o comportamento térmico do MIT, sua utilização no alcance dos objetivos propostos neste trabalho seria computacionalmente e laboratorialmente ineficiente. A utilização de parâmetros concentrados para a obtenção de valores médios de temperatura de operação do motor se torna conveniente na medida em que os efeitos da variação térmica causados pelos distúrbios de QEE serão observados nos pontos concentrados, tendo por referência os valores nominais do equipamento. Dessa forma, são aproveitadas as vantagens computacionais e de infraestrutura laboratorial que essa metodologia proporciona em relação ao uso de elementos finitos.

Do ponto de vista térmico, o MIT corresponde a um sistema termodinâmico, por meio do qual ocorrem trocas de calor entre os elementos e entre eles e o ambiente. Baseado nesse conceito, podem ser definidas as capacitâncias e resistências térmicas, as quais, aliadas às

fontes de calor, constituem elementos de um modelo térmico por parâmetros concentrados. Uma descrição dos três elementos que fazem parte de modelos térmicos é realizada a seguir:

- Resistência ou Condutância Térmica é a grandeza que quantifica a capacidade dos materiais em conduzir energia térmica. Estruturas feitas com materiais de alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente do que estruturas análogas feitas com materiais de baixa condutividade térmica. É uma característica específica de cada material e o seu valor depende das dimensões físicas da superfície condutora e da própria temperatura.
- Capacitâncias térmicas ou capacidade calorífica é a grandeza física que determina a relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a variação de temperatura nele observada. A capacitância térmica é uma propriedade extensiva, ou seja, proporcional à quantidade de material presente no corpo. Com isso, dois corpos compostos pela mesma substância, porém com massas diferentes, possuem diferentes capacidades caloríficas.
- Fontes de calor são elementos que adicionam energia térmica ao sistema. Em máquinas elétricas as fontes de calor são resultantes das perdas *Joule* inerentes ao processo de conversão de energia.

Sistemas térmicos e elétricos apresentam propriedades análogas, ou seja, eles obedecem a expressões semelhantes e também têm condições de contorno similares. Isso pode ser verificado pela comparação das equações básicas da eletricidade e da transmissão de calor.

O capítulo 3 desta dissertação detalha o modelo térmico simplificado empregado no desenvolvimento das análises, apresentando seu equacionamento e metodologia de aplicação.

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a fundamentação teórica sobre o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica de tensão, objetos de análise neste trabalho, abordando suas definições, causas, efeitos, métodos de quantificação e limites normativos considerados.

Em seguida foi explanada a fundamentação utilizada para o desenvolvimento da modelagem térmica para o motor de indução, que será objeto de análise nos capítulos posteriores.

3 - METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA LABORATORIAL

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com vistas ao cumprimento dos objetivos traçados para esta dissertação, qual seja, a análise do comportamento da temperatura de operação do MIT sob alimentação com desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, o presente capítulo descreve a metodologia e os procedimentos empregados para esse fim.

Para tanto, inicialmente será apresentada a infraestrutura laboratorial utilizada nos ensaios junto ao motor, bem como o seu sistema de controle, equipamentos e *software* associados.

Em seguida, serão detalhados os critérios de escolha dos valores de tensão de alimentação do MIT presentes nos bancos de dados, que consideram a aplicação dos supramencionados fenômenos individualmente e conjuntamente. Será então descrita a metodologia empregada para a elaboração do modelo térmico computacional e sua validação em laboratório.

Por fim, são descritas as propostas para o tratamento dos resultados obtidos e análises que serão posteriormente realizadas no capítulo 4.

3.2 – INFRAESTRUTURA LABORATORIAL

O Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes (REILab) do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB possui uma robusta infraestrutura que permite a realização de ensaios em máquinas elétricas submetidas a distúrbios no suprimento.

Para que os objetivos do trabalho possam ser atingidos, é necessário proceder em laboratório a submissão de um MIT a ensaios controlados envolvendo um grande número de diferentes condições de alimentação contendo um ou ambos os distúrbios em estudo. A infraestrutura desse laboratório, desenvolvida pelo trabalho (Silva, 2014), possibilita a aplicação automatizada ao motor de valores de tensão não ideais resultantes de um banco de dados de entrada, bem como o registro dos parâmetros de interesse em arquivos de saída. Dessa forma os ensaios propostos podem ser efetuados com o controle e a eficiência exigidos para a

análise aqui proposta. A Figura 3.1 apresenta um diagrama esquemático do sistema de controle do MIT utilizado nos ensaios laboratoriais.

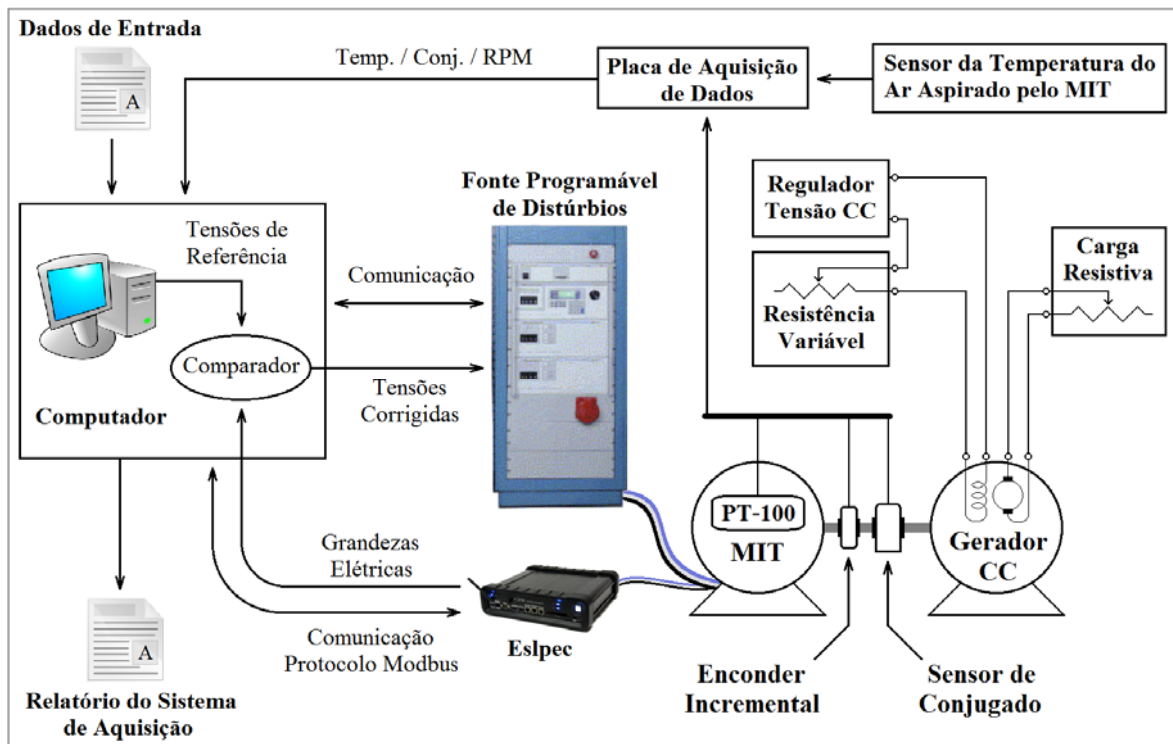


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do sistema de controle e geração de relatórios de saída.

A seguir, são apresentados cada um dos itens que compõem o sistema apresentado na Figura 3.1:

1. *Dados de Entrada*: Arquivo de texto contendo de forma sequencial os valores das tensões de referência em cada fase, a duração de cada condição, as distorções na forma de onda e um limite de segurança para as correntes de alimentação do MIT;
2. *Fonte de Distúrbios Programável California Instruments CSW 11100*: Responsável por gerar as tensões de alimentação do motor por meio de comandos oriundos do computador a ela conectada. A fonte é capaz de gerar sinais de tensão contendo os níveis desejados de desequilíbrio de tensão entre as fases e distorções na forma de onda;
3. *Espec modelo G4500*: Realiza a leitura e registro das tensões e correntes de alimentação do MIT submetido a distúrbios de QEE. O aparelho possui software próprio para aquisição dos dados, denominado *PQS Sapphire*. O sistema de controle do laboratório

executa as medições em tempo real por meio do padrão RS-422 e emprega o protocolo *Modbus*;

4. *Placa de Aquisição de Dados National Instruments NI PCI-6251*: Esta placa é responsável por ler os valores dos sensores para a sua posterior transformação em grandezas físicas. Ela realiza a leitura de tensões com alta taxa de amostragem e precisão. Possui um contador de pulsos.
5. *Motor de Indução Trifásico*: MIT de potência nominal igual a 1,5 kW (2 CV), classe de isolamento F, corrente nominal de 3,56 A nos enrolamentos, conexão em delta e fator de serviço de 1,15.
6. *Gerador de Corrente Contínua de 4 kW*: Acoplado ao eixo do MIT, opera como carga mecânica, resultando na operação do MIT em carregamento nominal. A sua bobina de campo é alimentada pelo regulador de tensão de corrente contínua em série com uma resistência variável, o que permite a realização de pequenos ajustes no nível de tensão. A sua armadura é conectada a uma carga resistiva variável. Os valores que as duas resistências variáveis devem assumir são aqueles que resultam nas correntes nominais do MIT quando alimentado por tensões equilibradas e em regime permanente. Os ajustes para essas resistências são mantidos inalterados durante a realização de todos os ensaios, de forma que as comparações dos resultados sejam feitas com o motor operando sempre em carregamento mecânico constante no seu eixo.
7. *Sensores de Temperatura do Tipo PT-100*: São utilizados quatro sensores, sendo três instalados nos enrolamentos do estator do MIT, medindo sua temperatura de operação, e um posicionado na entrada de ventilação da máquina, medindo a temperatura ambiente;
8. *Relatório do Sistema de Aquisição*: O sistema de controle gera relatórios contendo o registro das medições de todos os parâmetros desejados, em periodicidade preestabelecida. O relatório é salvo no formato de arquivo de texto com as leituras separadas por tabulações, o que permite uma conveniente conversão para uma planilha de dados.

O ambiente no qual toda a infraestrutura laboratorial descrita está inserida possui controle de temperatura ambiente, a qual deseja-se que se mantenha em um nível aproximadamente constante ao longo dos ensaios. A carga resistiva utilizada se localiza em ambiente distinto do restante dos equipamentos, de forma que assim o experimento não sofra influência indesejada dessa fonte de calor.

3.3 - ENSAIOS PARA CONDIÇÃO NOMINAL

A utilização do aparato laboratorial descrito anteriormente possibilita a aquisição dos dados relativos a corrente e temperatura nominais de operação para que (i) seja estabelecida a configuração das resistências da carga, que permanecem fixas durante todos os testes, e (ii) sejam registrados os valores nominais de corrente e temperatura de operação para uma alimentação sem a presença de distúrbios. Uma vez adquiridos os dados provenientes da etapa (ii), é estabelecida uma base de comparação para todos os resultados dos ensaios e simulações computacionais deste trabalho, de forma a se observar se a condição a ser analisada apresenta temperatura acima ou abaixo do valor nominal da máquina e em que magnitude.

A seguir, são exibidos alguns resultados relacionados à condição nominal de operação. A citação dessas informações no capítulo de descrição da metodologia empregada neste estudo se faz necessária para que se registrem os valores tomados por base de comparação em relação aos resultados apresentados no capítulo seguinte. Os valores provenientes do ensaio em condições nominais de alimentação e carregamento são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Resultados do ensaio do MIT sob condições nominais de alimentação e carregamento.

Tensão Nominal de Linha	Corrente Nominal		
	Máxima Entre as Fases (Plena Carga)	Temperatura Ambiente	Temperatura de Operação Máxima Entre as Fases
220 V	3,6 A	21,5 °C	78,5 °C

A obtenção dos valores apresentados na Tabela 3.1 ocorre após atingido o equilíbrio térmico do MIT. Para tanto, o motor é colocado em funcionamento sob as mencionadas condições e

sua temperatura é monitorada até que se atinja o seu regime térmico permanente. A curva apresentada na Figura 3.2 mostra o comportamento da temperatura durante a realização dessa etapa.

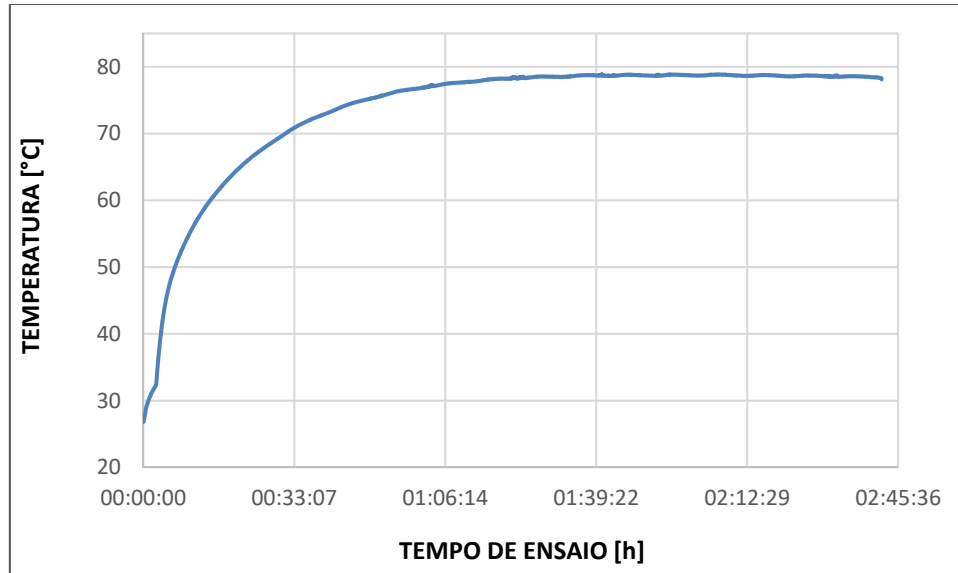


Figura 3.2– Temperatura de operação sob condições de alimentação e carga nominais.

Pela observação do gráfico da Figura 3.2, é possível verificar que o tempo necessário para se alcançar a temperatura de regime permanente, medida em 78,5 °C, foi de aproximadamente 1h45.

Ao longo deste trabalho, os resultados para a temperatura do motor submetido aos fenômenos avaliados são apresentados na forma percentual, tendo como base o valor de 78,5 °C obtido no equilíbrio térmico nominal da máquina. Dessa forma, a comparação da influência de cada distúrbio, e da aplicação de ambos simultaneamente, será observada de maneira mais evidente, na medida em que todos os resultados são apresentados proporcionalmente ao valor nominal da temperatura.

Por fim, ressalta-se que os resultados para a temperatura de operação do motor resultantes da aplicação do modelo computacional consideram a temperatura ambiente com valor constante, igual a 21,5°.

3.4 - BANCOS DE DADOS

Para que o principal objetivo desta dissertação, que é a análise da influência dos distúrbios de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica sobre as temperaturas do MIT, seja alcançado com êxito, faz-se necessário o emprego de um banco de dados de tensões de entrada que contemple variadas condições com a presença desses fenômenos, individualmente e concomitantemente. A seguir são descritos os critérios empregados para a definição dos valores.

3.4.1 – Banco de dados para desequilíbrio de tensão

Para que sejam efetuadas as análises da influência do desequilíbrio de tensão na temperatura de operação do MIT, e, posteriormente, realizada a comparação à aplicação concomitante de distorções harmônicas, elaborou-se um conjunto de valores de acordo com os critérios apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados de desequilíbrio de tensão.

Grandezas	Variação de Valores	Passo
V_1 [V]	191 a 233 (V_{linha})	5,25 V
FD [%]	0; 0,5; 1; ... 4	0.5 %
θ_2 [°]	0° a 120°	24 °
TOTAL	442 condições	

A Tabela 3.2 mostra que, para as 442 condições propostas nesse banco de dados contendo desequilíbrio, houve variação na tensão de sequência positiva (V_1), na tensão de sequência negativa (caracterizada pela variação no $FD\%$) e no ângulo da tensão de sequência negativa (θ_2). Dessa forma, esse banco de dados abarca a influência diversificada de diversos parâmetros que impactam a tensão desequilibrada.

A variação em V_1 , de 191 V a 233 V, foi definida com base nos limites impostos pelo PRODIST (ANEEL, 2017) para faixas de tensão precária, no caso de pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV. Os padrões estabelecidos pela IEEE 1159-2009 indicam o patamar de 2% para o $FD\%$. Dessa forma, com o objetivo de se preservar a

integridade da máquina em uso no laboratório, foi feita a opção por limitar o referido banco de dados a um valor de $FD\% = 4\%$, patamar igual ao dobro do limite normativo para esse indicador. Quanto ao ângulo da tensão de sequência negativa, as condições do banco de dados variam de 0° a 120° , percorrendo assim a toda gama de valores possíveis para essa grandeza. Assumindo que o motor possua impedâncias equilibradas, dados de entrada cujo valor de θ_2 seja superior a 120° necessariamente possuem uma condição correspondente em duplicidade, referida a outra fase, justificando o estabelecimento desse limite para essa grandeza.

A Tabela A1, presente no Apêndice, exhibe todos os valores do banco de dados para desequilíbrio de tensão.

3.4.2 – Banco de dados para distorção harmônica

Para que sejam efetuadas as análises da influência da distorção harmônica na temperatura de operação do MIT, e posteriormente a comparação à aplicação concomitante com desequilíbrio, é proposto um conjunto de valores conforme apresentado pela Tabela 3.3, contendo somente sinais com uma ordem harmônica.

Tabela 3.3 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados de distorção harmônica – Somente 1 ordem.

Ordem Harmônica	$DIT_h\%$
2	
3	
5	
7	De 1% a 10%, em passos de 1%
11	
13	
TOTAL	60 condições

A Tabela 3.3 exhibe as condições analisadas para distorção harmônica com somente 1 ordem. As ordens 3, 5, 7, 11 e 13 são escolhidas por serem aquelas mais comumente verificadas nos sistemas elétricos de baixa tensão, bem como aquelas mais estudadas por trabalhos anteriores que tratam sobre a influência desse fenômeno no MIT. Quanto à escolha da harmônica de

ordem 2, observa-se em alguns trabalhos como (Lee, 1998), (Brito, 2006) e (Neves, 2014) que essa ordem, apesar de ter ocorrência menos comum na rede, é aquela que influencia de maneira mais significativa os parâmetros de funcionamento da máquina.

Os valores definidos na Tabela 3.3 para o indicador $DIT_h\%$, tal qual o critério utilizado quando da escolha dos patamares para o desequilíbrio, possuem relação com o seu limite normativo. A IEEE-519-1992 apresenta o limite para a Distorção Harmônica Total de Tensão ($DTT\%$) de 5%. Uma vez que as análises deste trabalho consideram tanto ordens harmônicas individuais quanto combinação de duas ordens concomitantes, optou-se por um limite único de $DTT\%$ igual a 10% em ambos os casos, sendo esse valor equivalente ao dobro do patamar normativo supramencionado.

A Tabela 3.4 expõe os critérios considerados para a escolha das condições contendo combinação de duas ordens harmônicas.

Tabela 3.4 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados de distorção harmônica – 2 ordens simultâneas.

Ordem Harmônica (Combinações 2 a 2, sempre em mesmo nível individual)	$DIT_h\%$		
	Nível 1	Nível 2	Nível 3
2	1	2	5
3	2	5	8
5	2	5	8
7	1	3	5
11	2	3	5
13	2	3	5
TOTAL	45 condições		

As condições contendo duas ordens harmônicas simultâneas são formadas com base em combinações dos valores apresentados na Tabela 3.4. Cada condição representa uma diferente combinação de duas ordens com seus respectivos valores de $DIT_h\%$, dentro de um dos três níveis desse indicador exibidos na mencionada tabela. Assim, as combinações 2 a 2 são realizadas sempre dentro de um mesmo nível de $DIT_h\%$ (colunas da Tabela 3.4), proporcionando um total de 45 condições contendo duas ordens harmônicas simultâneas.

Os valores constantes na Tabela 3.4 para os três níveis de $DIT_h\%$ foram estabelecidos com base nos limites estabelecidos nas normas IEC 61000, descritos no item 2.3.4.2 desta dissertação, que impõe patamares diferenciados a cada ordem harmônica envolvida. Assim, os valores apresentados no Nível 1 da mencionada Tabela representam condições abaixo do limite da IEC 61000, aqueles no Nível 2 mostram condições próximas ao limite normativo enquanto que os valores do Nível 3 encontram-se acima do mencionado patamar.

Uma tabela com todos os valores do banco de dados para condições contendo somente distorção harmônica consta no Apêndice A.

3.4.3 – Banco de dados com a ocorrência de ambos os fenômenos simultaneamente

De maneira a possibilitar a análise dos efeitos na temperatura de operação do MIT resultantes da aplicação concomitante de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, as condições indicadas na Tabela 3.5 são apresentadas:

Tabela 3.5 – Critérios de escolha dos valores que compõem o banco de dados com ambos os fenômenos simultaneamente.

Condições Contendo Somente Desequilíbrio	Condições Contendo Somente Harmônicas	
	Somente 1 Ordem	2 Ordens Simultaneamente
Todas as condições apresentadas na Tabela 3.2.	Todas as ordens apresentadas na Tabela 3.3, porém somente nos níveis de $DIT_h\%$ presentes na Tabela 3.4.	Todas as condições apresentadas na Tabela 3.4.
Total: 442 Condições	Total: 18 condições	Total: 45 condições
TOTAL		
(Combinação Desequilíbrio + Harmônicas)		27.846 condições

Para a elaboração do banco de dados contendo a ocorrência simultânea dos fenômenos, todas as condições com somente desequilíbrio, previamente descritas no item 3.3.1, são associadas

às condições contendo somente harmônicas, com uma ou duas ordens simultâneas, conforme descrição exibida na Tabela 3.5. A combinação das 442 condições de desequilíbrio às 63 condições de distorção harmônica selecionadas (18 + 45) resulta em um total de 27.846 condições com a presença de ambos os distúrbios.

3.5 – MODELAGEM TÉRMICA DO MOTOR

Para que se tenha o resultado da temperatura de operação do MIT em todas as condições propostas no item 3.3, faz-se necessário o uso de ferramenta computacional capaz de representar o comportamento da máquina sob essas condições. Isso ocorre devido ao fato de que, mesmo após o alcance do equilíbrio térmico em uma condição operativa, os ensaios realizados demonstram que são necessários cerca de 16 minutos de funcionamento para que se atinja o novo ponto de equilíbrio térmico após a inserção de uma nova condição de alimentação. Uma vez que são propostas 28.351 diferentes condições nos bancos de dados descritos, a duração de um suposto ensaio para esses valores com o objetivo de registro da temperatura de equilíbrio se torna inviável no período disponível para um trabalho de mestrado.

O trabalho (Silva, 2014) faz o uso de metodologia computacional aplicável à proposta desta dissertação. O autor utiliza um modelo térmico computacional para representar a temperatura de operação do MIT com base no valor RMS de sua corrente elétrica de alimentação. Para tanto, inicialmente é descrita a modelagem matemática empregada. Em seguida são detalhadas as etapas envolvidas na validação do modelo computacional em laboratório.

3.5.1 – Definição da modelagem térmica

Conforme explanado no item 2.4, de forma a simplificar as análises, é conveniente admitir que o sistema térmico possa ser representado por um modelo a parâmetros concentrados, ou seja, o motor pode ser dividido em regiões de interesse onde a temperatura resultante de cada uma delas corresponde a um valor médio dessa parte da máquina. Dessa forma, o modelo térmico simplificado proposto em (Silva, 2014) é adotado, tendo base nas seguintes premissas:

- Toda a troca de calor inerente ao sistema térmico ocorre pelo processo de condução;
- O modelo é capaz de identificar as temperaturas do MIT somente quando ele se encontra em regime permanente. Dessa forma, as capacitâncias térmicas das partes integrantes do motor são desconsideradas;
- O modelo térmico proposto é simplificado, pois apenas as três temperaturas relacionadas às fases dos enrolamentos do estator são partes integrantes do sistema;
- Trabalha-se com três fontes de calor, uma para cada fase dos enrolamentos do estator. Entretanto, o calor gerado por outras fontes, por exemplo, nas barras do rotor, é ponderado quando do uso de regressões não lineares como método de estimação dos coeficientes do modelo.

Considerando os conceitos descritos no item 2.4 desta dissertação envolvendo resistência e capacitância térmica, fontes de calor, trocas de calor entre os enrolamentos e entre estes e o ambiente, bem como suas respectivas analogias a elementos de um circuito elétrico, é elaborado o circuito térmico mostrado na Figura 3.3:

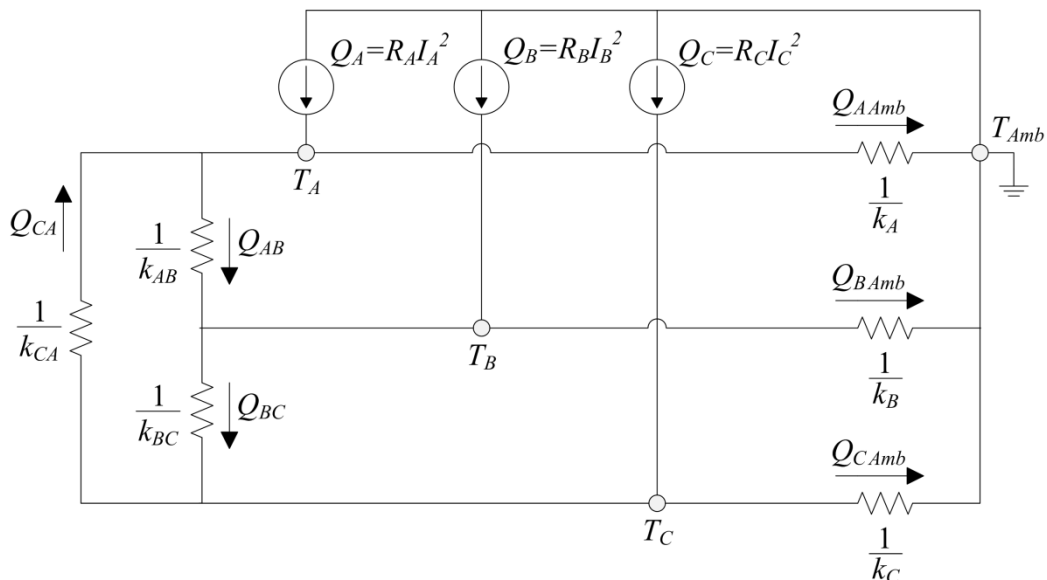


Figura 3.3 – Representação do modelo pelo circuito térmico do MIT (Silva, 2014).

Por sua vez, a análise nodal do circuito da Figura 3.3 permite a obtenção do sistema de equações (3.1):

$$\begin{cases} Q_A + Q_{CA} - Q_{AAmb} - Q_{AB} = 0 \\ Q_B + Q_{AB} - Q_{BAmb} - Q_{BC} = 0 \\ Q_C + Q_{BC} - Q_{AAmb} - Q_{CA} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Substituindo-se e rescrevendo-se os termos deste sistema, são obtidas as equações (3.2) e (3.3).

$$\begin{cases} Q_A + k_{CA} \cdot (T_C - T_A) - k_A \cdot (T_A - T_{Amb}) - k_{AB} \cdot (T_A - T_B) = 0 \\ Q_B + k_{AB} \cdot (T_A - T_B) - k_B \cdot (T_B - T_{Amb}) - k_{BC} \cdot (T_B - T_C) = 0 \\ Q_C + k_{BC} \cdot (T_B - T_C) - k_C \cdot (T_C - T_{Amb}) - k_{CA} \cdot (T_C - T_A) = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} -(k_{AB} + k_{CA} + k_A) \cdot T_A + k_{AB} \cdot T_B + k_{CA} \cdot T_C + k_A \cdot T_{Amb} + Q_A = 0 \\ k_{AB} \cdot T_A - (k_{AB} + k_{BC} + k_B) \cdot T_B + k_{BC} \cdot T_C + k_B \cdot T_{Amb} + Q_B = 0 \\ k_{CA} \cdot T_A + k_{BC} \cdot T_B - (k_{BC} + k_{CA} + k_C) \cdot T_C + k_C \cdot T_{Amb} + Q_C = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

A resolução do sistema de equações (3.3) resulta nas equações (3.4) a (3.6), que representam, respectivamente, as temperaturas T_A , T_B e T_C . Devido a grande quantidade de termos dessas expressões, elas são apresentadas empregando-se os índices definidos pela letra X, identificados nas equações (3.7) a (3.18).

$$T_A = T_{Amb} + \frac{X_4 + X_6 + X_8}{X_1 + X_2 + X_3} \quad (3.4)$$

$$T_B = T_{Amb} + \frac{X_5 + X_6 + X_9 + X_{11}}{X_1 + X_2 + X_3} \quad (3.5)$$

$$T_C = T_{Amb} + \frac{X_4 + X_7 + X_{10} + X_{12}}{X_1 + X_2 + X_3} \quad (3.6)$$

$$X_1 = k_{CA}[k_{AB}(k_A + k_B + k_C) + k_{BC}(k_B + k_C) + k_A(k_{BC} + k_B) + k_B k_C] \quad (3.7)$$

$$X_2 = k_{AB}[k_{BC}(k_B + k_C) + k_A(k_{BC} + k_C) + k_B k_C] \quad (3.8)$$

$$X_3 = k_A[k_{BC}(k_B + k_C) + k_B k_C] \quad (3.9)$$

$$X_4 = k_{CA}[(k_{AB} + k_{BC})Q_B + (k_{AB} + k_{BC} + k_B)Q_C] \quad (3.10)$$

$$X_5 = k_{CA}[(k_{AB} + k_{BC} + k_A + k_C)Q_B + (k_{AB} + k_{BC})Q_C] \quad (3.11)$$

$$X_6 = k_{AB}[(k_{BC} + k_C)Q_B + k_{BC}Q_C] \quad (3.12)$$

$$X_7 = k_{AB}[k_{BC}Q_B + (k_{BC} + k_A + k_B)Q_C] \quad (3.13)$$

$$X_8 = Q_A[k_{AB}(k_{BC} + k_C) + k_{BC}(k_B + k_C) + k_{CA}(k_{AB} + k_{BC} + k_B) + k_Bk_C] \quad (3.14)$$

$$X_9 = k_A[(k_{BC} + k_C)Q_B + k_{BC}Q_C] \quad (3.15)$$

$$X_{10} = k_A[k_{BC}Q_B + (k_{BC} + k_B)Q_C] \quad (3.16)$$

$$X_{11} = Q_A[k_{AB}(k_{BC} + k_C) + k_{CA}(k_{AB} + k_{BC})] \quad (3.17)$$

$$X_{12} = Q_A[k_{CA}(k_{AB} + k_{BC} + k_B) + k_{AB}k_{BC}] \quad (3.18)$$

Onde:

- R_A, R_B, R_C - resistências elétricas dos enrolamentos do estator, respectivamente, para as fases A, B e C;
- I_A, I_B, I_C - correntes elétricas que circulam pelos enrolamentos do estator, respectivamente, para as fases A, B e C;
- k_A, k_B, k_C - coeficientes de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator e o ar ambiente, respectivamente, para as fases A, B e C (W/°C);
- k_{AB}, k_{BC}, k_{CA} - coeficientes de condutividade térmica entre as fases dos enrolamentos do estator, respectivamente, entre as fases A-B, B-C e C-A (W/°C);

Nota-se que as temperaturas nas três fases são dependentes da potência elétrica dissipada, ou seja, das correntes e resistências dos enrolamentos do estator, dos coeficientes de condutividade térmica empregados no modelo, e da própria temperatura ambiente. Como as resistências e os coeficientes de condutividade térmica são constantes, as equações (3.4) a (3.6) permitem concluir que as temperaturas T_A , T_B e T_C provenientes dessa modelagem simplificada dependem somente das correntes elétricas e da temperatura ambiente (Silva, 2014).

Dessa forma, a modelagem descrita se torna capaz de representar o comportamento da temperatura do motor submetido aos distúrbios de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, tendo como parâmetro de entrada as correntes RMS medidas nas três fases.

3.5.2 – Validação do modelo em laboratório

O modelo térmico simplificado do MIT descrito na seção anterior possui por dados de entrada o valor da corrente elétrica RMS verificada nas três fases, além da temperatura ambiente. As resistências elétricas e a condutividade térmica representam parâmetros fixos,

inerentes às características físicas do sistema motor-carga. A validação laboratorial propõe-se a estimar esses parâmetros de forma que o modelo computacional seja capaz de representar com fidelidade a temperatura resultante da aplicação de cada condição de entrada. A Tabela 3.6 apresenta as informações compiladas para a utilização do modelo simplificado.

Tabela 3.6 – Grandezas empregadas nas regressões não lineares para a obtenção dos coeficientes do modelo térmico do MIT.

Grandezas	Variáveis
Coeficientes	$k_A; k_B; k_C; k_{AB}; k_{BC}; k_{CA}; R_A; R_B; R_C$
Entradas	$I_A; I_B; I_C; T_{Amb}$
Saída	$T_A; T_B; T_C$

A validação em laboratório dos coeficientes do modelo descritos na Tabela 3.6 abrange as seguintes etapas:

1. Inicialmente, das 28.351 condições de entrada estipuladas para os bancos de dados deste estudo, selecionam-se aleatoriamente 1.046 valores, o que representa cerca de 3,6% do universo. Dentre as 1.046 condições selecionadas, necessariamente se encontram todas as 63 condições contendo somente harmônicas. Dado que se trata de uma quantidade pequena de condições frente ao total, torna-se possível a realização dos ensaios com equilíbrio térmico para a totalidade desse conjunto de valores.
2. Com o motor operando em temperatura de regime, realizam-se, para as 1.046 condições selecionadas, ensaios com duração de 16 minutos em cada, com o objetivo de se registrar as correntes de entrada e a temperatura de operação para esses valores.
3. De posse dos valores de entrada e saída medidos em laboratório (correntes elétricas e temperatura de equilíbrio, respectivamente), procede-se a estimação dos coeficientes do modelo térmico. Para tanto, inicialmente, atribuem-se valores aleatórios a cada um deles: $k_A; k_B; k_C; k_{AB}; k_{BC}; k_{CA}; R_A; R_B; R_C$. Em seguida, aplica-se a função de otimização *lsqcurvefit*, presente no toolbox de otimização (*optimization toolbox*) do software MATLAB. Trata-se de uma função que

possibilita a resolução de problemas de ajuste de curvas não lineares por meio do método dos mínimos quadrados. Uma vez que a mencionada função realiza o ajuste dos valores estabelecidos aos parâmetros em relação às medidas de corrente elétrica de entrada e temperatura de saída obtidas em laboratório, obtém-se um conjunto otimizado para essas grandezas em relação aos resultados experimentais. Esse conjunto de valores fixos será usado de forma definitiva para compor o modelo térmico simplificado utilizado no processamento dos bancos de dados propostos neste trabalho.

4. Por fim, para a avaliação da capacidade de generalização do modelo térmico e efetivação da sua validação, inicialmente, selecionam-se aleatoriamente 80% das 1.046 condições ensaiadas em laboratório até o equilíbrio térmico do motor (837 condições). Em seguida, utiliza-se a função de otimização no MATLAB para se estimar um conjunto de coeficientes do modelo térmico, empregando-se o conjunto de 80% das amostras selecionadas. De posse dos coeficientes do modelo térmico, as 20% condições remanescentes (209 condições) dessa escolha aleatória são empregadas para se identificar as discrepâncias entre os valores de temperaturas encontrados nos ensaios em laboratório e aqueles oriundos do modelo térmico. Com isso, ao final dessa etapa, tem-se 209 valores de erros. Em seguida, as ações relacionadas à seleção aleatória de 80% das grandezas de entrada (sempre dentro das 1.046 condições selecionadas inicialmente), obtenção de parâmetros otimizados e utilização das 20% condições remanescentes para registro de erros, são repetidas outras 2999 vezes. Após as mencionadas etapas, têm-se $209 \times 3000 = 627.000$ valores de erros. Calcula-se então o erro médio, o erro máximo, e o desvio padrão. A Tabela 3.7 expõe os resultados obtidos após a execução dessa etapa de validação do modelo térmico simplificado.

Tabela 3.7 – Erro médio, erro máximo e desvio padrão resultantes da etapa de validação do modelo térmico.

Grandezas	Valores
Média do Erro Médio [%]	0,60 %

Máximo Erro [%]	2,79 %
Desvio Padrão do Erro	0,48 %

Os resultados apresentados na Tabela 3.7 mostram que a validação dos parâmetros do modelo em laboratório foi bem-sucedida, na medida em que o erro médio não passa de 0,6 %, com desvio padrão igual a 0,48 %.

Uma vez que a utilização de 80% das condições ensaiadas para obtenção de temperatura de operação foi suficiente para a obtenção de uma modelagem robusta, os parâmetros obtidos por meio da otimização em MATLAB, descritos na etapa 3 desta seção, serão aqueles utilizados de maneira definitiva no modelo térmico simplificado quando do processamento dos demais resultados. A aplicação das etapas descritas neste item, após realizados os ensaios em laboratório, resultaram nos parâmetros para o modelo térmico computacional validado mostrados na Tabela 3.8:

Tabela 3.8 – Parâmetros para o modelo térmico após a validação em laboratório

k_A	k_B	k_C	k_{AB}	k_{BC}	k_{CA}	R_A	R_B	R_C
0,7472	0,6928	0,8106	0,8232	0,8496	0,8397	3,2628	3,1	3,3

Após efetivada a validação dos parâmetros do modelo, os procedimentos laboratoriais se encerram com a realização dos ensaios para o motor submetido a todas as 27.305 condições restantes (28.351 condições no total menos 1.046 utilizadas para a validação), desta vez por 30 segundos cada. O objetivo dessa etapa é registrar os valores de corrente elétrica para cada condição do banco de dados. Uma vez que já se tem um modelo térmico capaz de representar as temperaturas do motor de maneira eficiente, torna-se suficiente o conhecimento das correntes elétricas associadas a cada condição a ser analisada para que, ao se utilizar da modelagem computacional, sejam obtidos todos os valores de saída de forma imediata.

3.6 - ANÁLISES DOS RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS INDICADORES

Para execução das análises da influência na temperatura do MIT do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica, aplicados individualmente e simultaneamente, são efetuados os procedimentos descritos nesta seção. Inicialmente, são colocadas as seguintes premissas:

- Conforme mencionado em item pretérito, todos os valores de temperatura são apresentados nos resultados na forma percentual, tendo por base a temperatura nominal do motor a plena carga. Dessa forma, tornam-se mais evidentes os efeitos a serem estudados.
- O valor utilizado para a temperatura de operação é sempre o maior registrado entre as três fases para cada condição de entrada, uma vez que a falha no isolamento por operação em temperatura acima do valor recomendado ocorre no ponto mais crítico a que a máquina está submetida.
- Utiliza-se como indicador principal para o desequilíbrio de tensão o $FD\%$, de acordo com o estabelecido no Prodist (ANEEL, 2017). Da mesma forma, para as distorções harmônicas, é adotado o indicador $DTT\%$, nos termos da referida norma.

Uma vez estabelecidas as supracitadas condições, são então descritos os procedimentos e critérios empregados para o alcance dos resultados almejados neste trabalho.

3.6.1 – Análise do banco de dados com somente desequilíbrio de tensão

São apresentados os resultados da temperatura do motor oriundos da aplicação sobre o modelo térmico computacional do banco de dados de alimentação contendo 442 condições com a presença somente do desequilíbrio de tensão. Para tanto, é avaliado o comportamento da temperatura frente a variações no $FD\%$, por ser esse o indicador majoritariamente utilizado pelos dispositivos normativos que versam sobre esse fenômeno.

Os resultados são apresentados em um gráfico no formato *boxplot* relacionando temperatura e $FD\%$. Essa representação possibilita a identificação do comportamento dos valores médios da temperatura, valores mínimos, máximos bem como os indicadores de dispersão em cada ponto do eixo das abcissas.

3.6.2 – Análise do banco de dados com somente distorção harmônica

Nessa etapa, são apresentados os resultados da temperatura do motor oriundos da aplicação sobre o modelo térmico computacional do banco de dados de alimentação contendo

210 condições com a presença somente de distorção harmônica de tensão. Para tanto, é avaliado o comportamento da temperatura frente a variações na condição harmônica: (i) com a presença de somente uma ordem e (ii) combinações de duas ordens. Em ambos os casos, são aplicadas variações de intensidade do indicador $DIT_h\%$ de 1% a 10% em cada ordem harmônica individual envolvida, culminando em variações de $DTT\%$ de 1% a 14,14% no caso de combinação de duas ordens.

3.6.3 – Comparação entre os efeitos individuais do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica

Apresentados os resultados obtidos para os efeitos individuais dos distúrbios sobre a temperatura do MIT, elabora-se um gráfico contendo os pontos relativos ao desequilíbrio sobrepostos aos pontos relativos às harmônicas, sendo todos eles posicionados em ordem crescente de temperatura. Dessa forma, efetua-se a comparação sobre a intensidade dos efeitos individuais desses fenômenos sobre o MIT e conclui-se sobre qual deles tende a oferecer, isoladamente, maior impacto térmico à máquina.

Para que se efetue a mencionada comparação dos efeitos, é realizada uma filtragem nos valores inseridos neste gráfico, de maneira que as condições contendo somente desequilíbrio se limitem a valores de $FD\%$ dentro do intervalo de 0% a 4% e que as condições contendo somente harmônicas se limitem a valores de $DTT\%$ dentro do intervalo de 0% a 10%. Os valores de $FD\% = 4\%$ e $DTT\% = 10\%$ foram escolhidos por representarem patamares iguais ao dobro dos limites normativos estabelecidos a cada um dos indicadores.

3.6.4 – Análise das condições contendo ambos os fenômenos simultaneamente

Na apresentação do resultado para a aplicação simultânea de ambos os fenômenos, é elaborado um gráfico que mostra a variação da temperatura do motor resultante da aplicação sobre o modelo térmico computacional do banco de dados com 27.846 condições de alimentação contendo a presença simultânea de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica. O mencionado gráfico é elaborado em escala tridimensional, possibilitando a visualização da influência do $FD\%$ (eixo x) e da $DTT\%$ (eixo y) na temperatura (eixo z) quando da presença simultânea dos distúrbios.

O mencionado banco de dados contendo 27.846 condições com a presença simultânea dos fenômenos é elaborado por meio da combinação de todos os 442 valores de desequilíbrio de tensão com uma seleção de 63 condições com uma ordem harmônica ou combinação de duas ordens.

Utilizando-se dos resultados provenientes da aplicação conjunta dos fenômenos, é elaborado um gráfico *boxplot* relacionando a temperatura ao $FD\%$. Dessa forma, torna-se possível a realização da comparação entre o efeito das 442 condições de desequilíbrio sobre a temperatura do MIT e o efeito resultante da combinação desses mesmos valores associados a variadas condições contendo distorção harmônica.

3.6.5 – Análise dos efeitos – caso selecionado

Esta etapa tem por objetivo analisar valores para a aplicação concomitante dos distúrbios e compará-los ao resultado da superposição dos efeitos verificados para os fenômenos de forma individualizada.

Considerando o banco de dados formado pelas 27.846 condições utilizadas na avaliação dos efeitos conjuntos, são selecionadas aquelas que apresentam $FD\%$ igual a 2%, uma vez que esse é o limite estabelecido pela norma IEEE 1159-2009 para desequilíbrio de tensão. Da mesma forma, são selecionados casos com a ocorrência de harmônicas cujos valores da $DTT\%$ sejam iguais a 5%, valor limite estabelecido IEEE-519-1992 para esse distúrbio.

A cada uma das condições contendo a ocorrência individual dos fenômenos atendendo aos critérios supramencionados, relaciona-se o resultado obtido quando da ocorrência simultânea desses valores. Dessa forma, a seleção final será composta pelas condições com somente desequilíbrio e somente harmônicas obedecendo o critério estabelecido (limite normativo), bem como pelas condições correspondentes à aplicação concomitante desses mesmos valores.

3.6.6 – Adequabilidade de indicadores de QEE propostos

As análises descritas nos itens anteriores possibilitam a averiguação da adequabilidade dos indicadores $FD\%$ e $DTT\%$ para relacionar os efeitos na temperatura do MIT causados por

desequilíbrio e distorção harmônica, respectivamente. Apesar de tratarem-se de índices consagrados pelas diversas normas vigentes, os efeitos resultantes da aplicação concomitante desses fenômenos devem ser ponderados para a sua quantificação, fato este não considerado pelas respectivas metodologias de cálculo.

Com o objetivo de se representar a contribuição individual do desequilíbrio e da distorção harmônica quando da ocorrência simultânea, este tópico se propõe a avaliar o desempenho de dois indicadores alternativos: (i) aquele formado pela regressão das curvas formadas pelos pontos médios dos gráficos que relacionam temperatura ao $FD\%$ e à $DTT\%$, e (ii) aquele proposto em (Duarte, 2010), que utiliza a Transformada de *Park* para a obtenção de parâmetros que quantificam os fenômenos.

Para o caso (i) citado, proposto neste trabalho, procede-se a elaboração de dois gráficos: Um relaciona a temperatura à $DTT\%$, e o outro relaciona a temperatura ao $FD\%$. Esse resultado possibilita a obtenção das equações para a regressão que melhor se adequa ao posicionamento dos pontos médios. O indicador proposto é então formado pela combinação algébrica de ambas as regressões, obtendo-se assim uma expressão que considera ambos os fenômenos simultaneamente, ponderada pelos resultados reais do MIT.

O caso supramencionado (ii) é baseado no trabalho desenvolvido em (Duarte, 2010). O autor desenvolve um índice de QEE que comporta as influências do desequilíbrio e das harmônicas na temperatura do motor de indução por meio do uso da Transformada de *Park* (dq0) nos sinais de tensão de entrada. O índice, denominado $FQu\%$ é formado pelos fatores $FDu\%$, relacionado ao desequilíbrio e $FHu\%$, relacionado às harmônicas. As expressões para esses índices são exibidas nas equações 3.19 a 3.21:

$$FDu\% = \frac{\frac{máx(u_{1d}) - \min(u_{1d})}{2}}{méd(u_{1d})} \times 100\% \quad (3.199)$$

Onde:

- $FDu\%$ - É o parâmetro de qualidade que indica o fator de desequilíbrio de tensão obtido da componente no eixo d;
- $máx(u_{1d})$ - Valor máximo verificado para a amplitude da componente no eixo d;

- $\min(u_{1d})$ - Valor mínimo verificado para a amplitude da componente no eixo d;
- $\text{méd}(u_{1d})$ - Valor médio verificado para a amplitude da componente no eixo d, obtida em um período do sinal de frequência fundamental.

$$FHu\% = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(u_{hdi})^2}}{\frac{\text{méd}(u_{1d})}{\sqrt{2}}} \times 100\% \quad (3.20)$$

Onde:

- $FHu\%$ - É o parâmetro de qualidade que indica o fator de distorção harmônica total obtido da componente no eixo d;
- u_{hdi} - São os valores instantâneos do sinal no eixo d correspondentes às harmônicas;
- n - É o número de amostras presentes em um período do sinal na frequência fundamental.

$$FQu\% = k_1 FDu\% + k_2 FHu\% + k_3 \quad (3.21)$$

Onde:

- $FQu\%$ - É o parâmetro de qualidade obtido pela combinação dos parâmetros $FDu\%$ e $FHu\%$;
- k_1 e k_2 - São constantes de ponderação que atribuem o peso com que o desequilíbrio e as harmônicas, respectivamente, devem contribuir na formação do indicador $FQu\%$;
- k_3 - É o termo independente

3.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve início com a descrição da estrutura laboratorial utilizada para a realização dos ensaios experimentais dos distúrbios analisados sobre o motor de indução. Em seguida, foram apresentados os critérios adotados para a escolha dos valores que compõem os bancos de dados contendo as condições não ideais de suprimento utilizadas para a obtenção dos resultados almejados para este trabalho.

Posteriormente, o modelo térmico computacional adotado foi descrito e o seu equacionamento matemático foi desenvolvido. Apresentaram-se, então, os procedimentos empregados para a validação em laboratório dessa metodologia.

Ao final, foram expostas as propostas de análises adotadas, incluindo a descrição dos gráficos e elaboração dos indicadores de QEE, que resultam nas apresentações dos resultados exibidos no capítulo 4 da dissertação.

4 - RESULTADOS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo expõe os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo térmico computacional simplificado descrito no capítulo 3. A execução da metodologia proposta possibilita a verificação do comportamento da temperatura de operação do MIT frente aos fenômenos de desequilíbrio e distorção harmônica de tensão, aplicados individualmente e concomitantemente.

Ao longo desse processo, é também desenvolvida uma análise das temperaturas do MIT frente aos limites presentes em normas que versam sobre o desequilíbrio de tensão. Com isso, pretende-se avaliar a adequabilidade dos índices estabelecidos nestes documentos.

Por fim, é realizada uma comparação da utilização de dois indicadores que consideram a aplicação concomitante de desequilíbrio e harmônicas na sua quantificação, verificando o desempenho da eficiência dos seus resultados.

4.2 – RESULTADOS PARA AS CONDIÇÕES COM SOMENTE A PRESENÇA DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da temperatura do motor oriundos da aplicação sobre o modelo térmico computacional do banco de dados de alimentação descrito pela Tabela 3.2, contendo 442 condições com a presença somente do distúrbio de desequilíbrio de tensão.

A Figura 4.1 apresenta o gráfico *boxplot* relativo ao comportamento da temperatura do motor em função do $FD\%$, para este conjunto de valores.

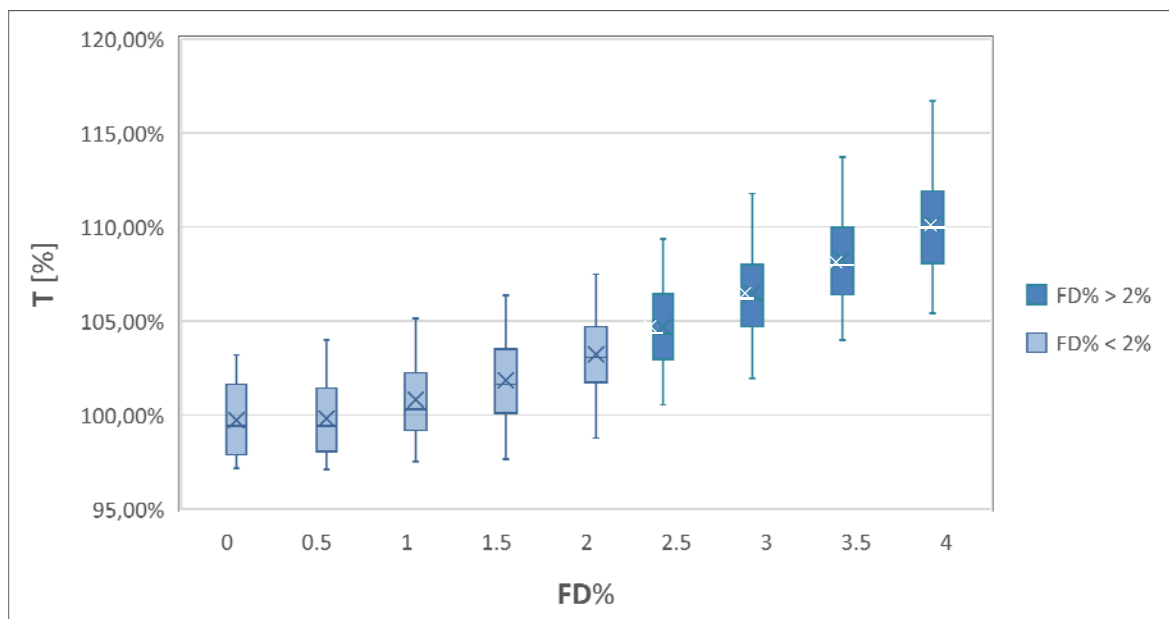


Figura 4.1 – Temperatura de operação sob condições de desequilíbrio de tensão.

Da Figura 4.1, observa-se o comportamento crescente das temperaturas médias (representada pelo símbolo X no gráfico) e máxima em função do $FD\%$. No entanto, há a existência, em um mesmo valor de $FD\%$, de uma considerável faixa de variação entre os valores de temperatura associados a essas condições. Pela análise do referido gráfico, nota-se ainda a ocorrência de um crescimento na amplitude dos valores de temperatura para um mesmo $FD\%$. Essas observações podem ser também verificadas pela análise dos dados presentes na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Resultados para as condições com somente desequilíbrio.

FD%	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$T_{méd}$	99.73%	99.82%	100.82%	101.86%	103.23%	104.69%	106.46%	108.26%	110.13%
T_{min}	97.16%	97.11%	97.54%	97.67%	98.77%	100.55%	101.97%	103.98%	105.42%
$T_{máx}$	103.20%	104.00%	105.13%	106.36%	107.49%	109.36%	111.78%	113.72%	116.70%
Amplitude ($T_{máx} - T_{min}$)	6.03%	6.89%	7.60%	8.69%	8.72%	8.81%	9.81%	9.74%	11.27%

Os resultados crescentes apresentados na Tabela 4.1 para a amplitude ($T_{máx} - T_{min}$) validam as conclusões visuais descritas com base no gráfico da Figura 4.1. Essa constatação indica que a utilização do $FD\%$ para quantificar os efeitos do referido distúrbio na temperatura do MIT se torna menos eficiente à medida que seu valor se eleva. Para as 442 condições de

desequilíbrio de tensão avaliadas, a maior temperatura de operação do MIT ($T_{m\acute{a}x}$) foi 16,7% acima da temperatura de operação sob alimentação e cargas nominais. A menor temperatura ($T_{m\acute{i}n}$) sob essas condições é 2,89% abaixo do patamar nominal.

Por fim, ainda em relação à Figura 4.1, observa-se que as condições de alimentação que possuem índices de $FD\%$ acima de 2% (patamar que representa o limite de algumas normas internacionais que versam sobre o desequilíbrio de tensão), culminam, em todos os casos avaliados nessa dissertação, em valores de temperatura acima do observado na condição nominal. No entanto, há condições de desequilíbrio de tensão com $FD\%$ abaixo do limite de 2% que também resultam em temperaturas acima do valor nominal de operação. Considerando os aspectos ora mencionados, conclui-se que a utilização somente do $FD\%$ como indicador para a quantificação do desequilíbrio não é satisfatória.

4.3 - RESULTADOS PARA AS CONDIÇÕES COM SOMENTE A PRESENÇA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados da temperatura do motor oriundos da aplicação sobre o modelo térmico computacional do banco de dados de alimentação contendo 210 condições com a presença somente de distorção harmônica de tensão.

O gráfico exposto na Figura 4.2 mostra o comportamento da temperatura de operação do MIT submetido às variações de intensidade do indicador $DIT_h\%$ de 1% a 10% em cada ordem harmônica envolvida, culminando em variações de $DTT\%$ de 1% a 14,14% no caso de combinação de duas ordens.

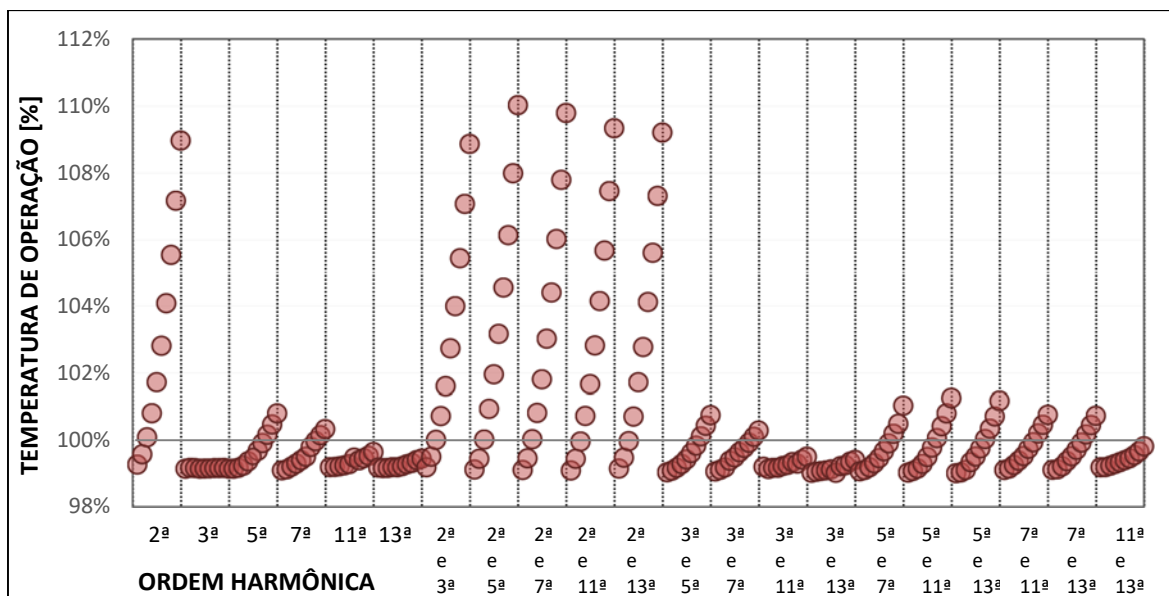


Figura 4.2 – Temperatura de operação sob condições de distorção harmônica de tensão.

O gráfico da Figura 4.2 apresenta os resultados para a temperatura de operação do MIT submetido a diferentes ordens harmônicas individuais (2^a, 3^a, 5^a, 7^a, 11^a e 13^a), combinações de duas dessas ordens, e variações nos seus níveis de intensidade em relação à tensão nominal (indicadores $DIT_h\%$ e $DTT\%$). Para cada uma das condições indicadas no eixo das abscissas do gráfico, há um conjunto de dez pontos que representam, em ordem crescente do indicador, a temperatura do motor para cada nível de $DIT_h\%$ (1% a 10%).

É possível observar que, em todos os casos, o aumento na intensidade da $DIT_h\%$ resulta em uma elevação na temperatura. No entanto, essa elevação se mostra muito discreta em boa parte dos resultados avaliados. A elevação na temperatura de operação é mais representativa somente nas condições que envolvem a harmônica de ordem 2, aplicada individualmente e também quando combinada às demais ordens. Para esses casos, verifica-se uma elevação na temperatura de até 10% em relação à condição nominal do motor.

Nas demais condições, não se verifica um aumento significativo na temperatura com a variação das ordens harmônicas envolvidas e do nível de $DIT_h\%$. A elevação máxima verificada nessas condições foi menor que 2%. Ademais, essas condições, na maioria das ocorrências, culminam na operação do MIT com temperatura abaixo do valor nominal.

4.4 – COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS INDIVIDUAIS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Uma vez descritos nas seções 4.2 e 4.3 os efeitos individuais dos distúrbios estudados neste trabalho sobre a temperatura do MIT, a presente seção tem por objetivo realizar a uma comparação entre os resultados.

A Figura 4.3 mostra as temperaturas do motor adquiridas por meio da aplicação de todas as 442 condições com somente desequilíbrio de tensão, bem como das 210 que contém somente harmônicas. Os pontos relativos a cada distúrbio são posicionados em ordem crescente do valor da temperatura. Ainda, conforme descrito no item 3.5.4 do capítulo 3, o gráfico apresentado na Figura 4.3 foi elaborado mediante a utilização de condições de entrada que apresentam indicadores normativos com valor até o dobro do limite estabelecido pelo IEEE para cada distúrbio.

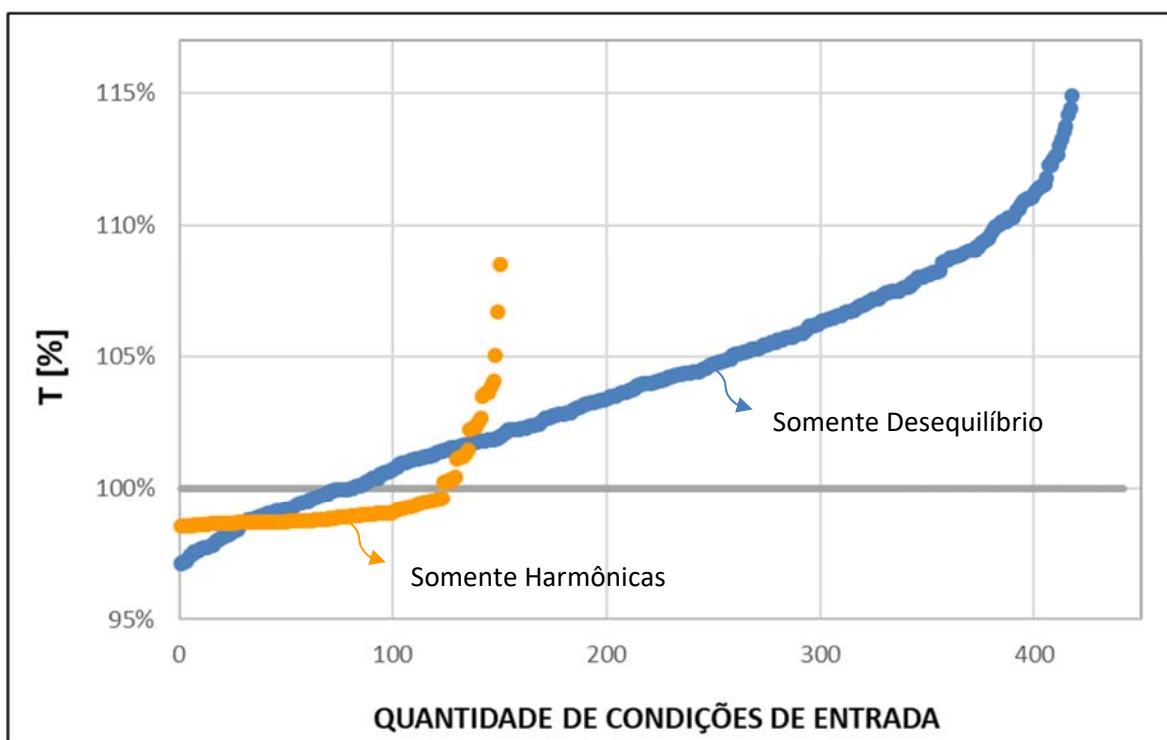


Figura 4.3 – Comparação entre a aplicação individual dos distúrbios.

Nota-se da Figura 4.3 que a maior parte das condições contendo somente harmônicas resultou em valores de temperatura abaixo da observada na condição nominal, enquanto que

a maior parte das condições contendo somente desequilíbrio culminou em temperaturas acima desse patamar.

Os efeitos provocados por condições com a presença de harmônicas resultaram em uma temperatura máxima 8,46% acima da nominal. Já aqueles provocados pelo desequilíbrio culminaram em uma temperatura de operação máxima 14,92% acima da nominal.

Uma vez que as condições aqui consideradas se enquadram em critérios equivalentes (até o dobro do limite normativo de cada fenômeno), conclui-se que, em geral, condições com somente desequilíbrio de tensão tem impacto mais significativo na temperatura do que condições com somente distorções harmônicas.

4.5 – RESULTADOS PARA AS CONDIÇÕES CONTENDO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DISTORÇÃO HARMÔNICA SIMULTANEAMENTE

Nesta seção, são apresentados os resultados da temperatura do motor oriundos da aplicação sobre o modelo térmico computacional do banco de dados contendo 27.846 condições de alimentação com a presença simultânea de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica.

As Figuras 4.4(a), 4.4(b) e 4.4(c) apresentam o resultado para a temperatura de operação do MIT submetido a ambos os distúrbios simultaneamente.

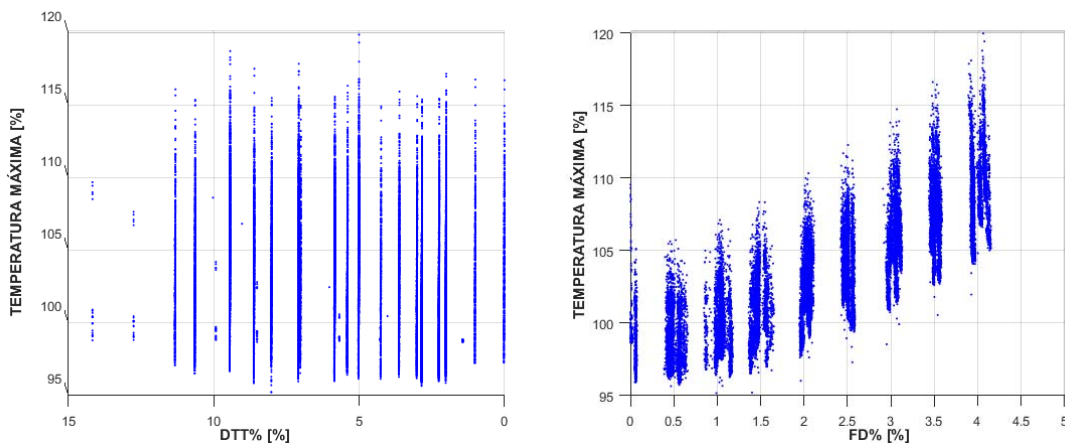
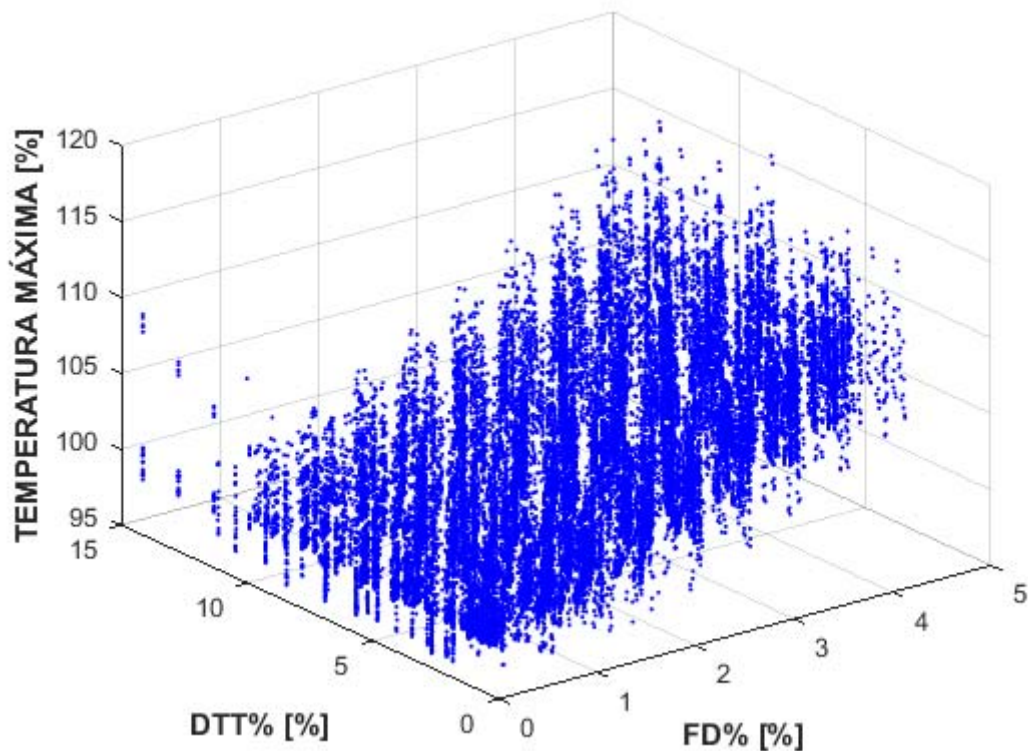


Figura 4.4 – (a) Eixo tridimensional com o resultado para a aplicação de ambos os fenômenos simultaneamente, em função de $FD\%$ e $DTT\%$; (b) Visão lateral: Temperatura x $DTT\%$; e (c) Visão lateral: Temperatura x $FD\%$

Observa-se das Figuras 4.4(a), 4.4(b) e 4.4(c) uma tendência de crescimento da temperatura do motor com o aumento do $FD\%$, tal qual verificado pela Figura 4.1. Em relação ao eixo que representa as variações da temperatura em relação à $DTT\%$, não é possível identificar um padrão, evidenciando que esse indicador aplicado isoladamente não é eficiente para representar o comportamento térmico da máquina.

Com o intuito de se efetuar uma comparação entre os resultados obtidos para a ocorrência simultânea dos distúrbios e a ocorrência individualizada, elaborou-se o gráfico mostrado na Figura 4.5, no formato *boxplot*. Trata-se da apresentação do gráfico mostrado na Figura 4.1 (em azul), em conjunto com o resultado obtido para a aplicação concomitante dos fenômenos (em laranja). A comparação se torna possível uma vez que, para a elaboração do banco de dados com ambos os fenômenos concomitantes, as mesmas 442 condições de desequilíbrio utilizadas na obtenção dos resultados da Figura 4.1 são combinadas ao grupo com a seleção de 63 condições harmônicas.

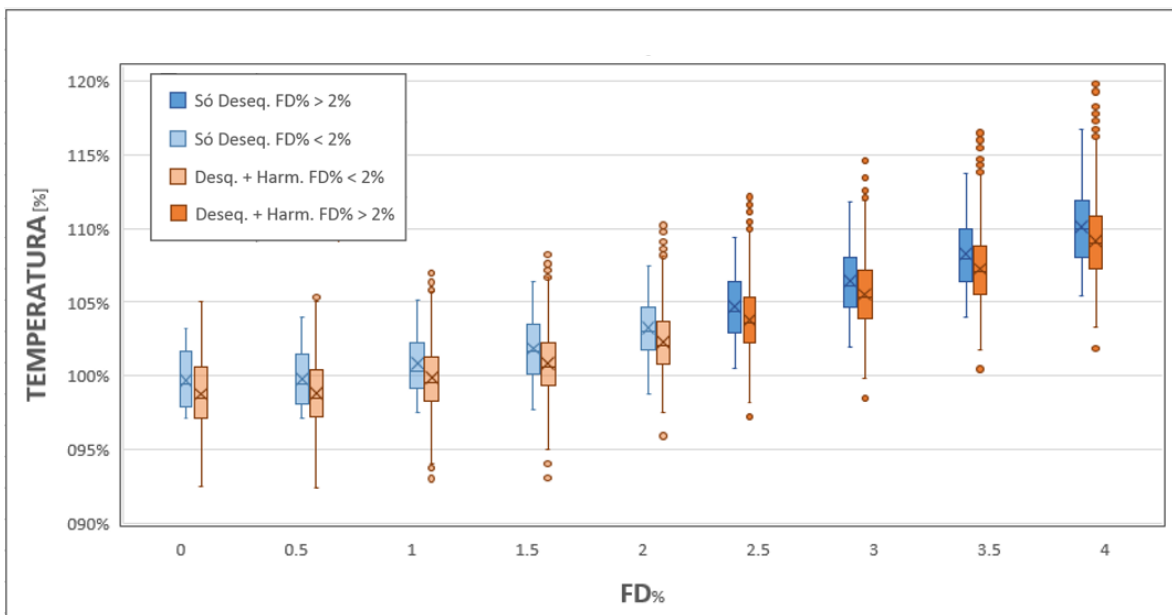


Figura 4.5 – Temperatura de operação sob condições de desequilíbrio de tensão.

É possível observar da Figura 4.5 que o valor médio das condições contendo ambos os fenômenos simultaneamente (representado pelo símbolo X no gráfico de cor laranja) é inferior àquele resultante da aplicação de somente desequilíbrio (representado pelo símbolo X no gráfico de cor azul), para todos os níveis de $FD\%$.

No entanto, nota-se que valores máximos de temperatura para condições com ambos os fenômenos são maiores que aqueles verificados para condições com somente desequilíbrio, em todos os níveis de $FD\%$ analisados. Da mesma forma, verifica-se que os valores mínimos para as condições com a presença concomitante dos distúrbios são menores que aqueles apresentados nas condições com somente desequilíbrio. Conclui-se então que há um aumento na faixa de variação (ΔT) de valores de temperatura quando da presença

simultânea de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, comparado aos casos em que há somente a ocorrência do primeiro fenômeno. Essa observação pode ser verificada com maior precisão por meio da análise dos valores apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Quadro comparativo para a faixa de variação dos resultados na ocorrência somente de desequilíbrio e de ambos os fenômenos simultaneamente.

FD%	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$\Delta T_{\text{só deseq.}}$ ($T_{\text{máx}} - T_{\text{min}}$)	6,03%	6,89%	7,60%	8,69%	8,72%	8,81%	9,81%	9,74%	11,27%
$\Delta T_{\text{deseq.+harm.}}$ ($T_{\text{máx}} - T_{\text{min}}$)	12,49%	13,19%	13,95%	15,13%	14,26%	14,94%	16,15%	16,01%	17,96%

Observa-se da Tabela 4.2 que a faixa de variação ΔT ($T_{\text{máx}} - T_{\text{min}}$) é maior quando há a ocorrência de ambos os fenômenos simultaneamente. A Figura 4.6 ilustra os dados da Tabela 4.2 para a faixa de variação ΔT de forma gráfica, incluindo a regressão linear dos pontos. Dessa forma, torna-se possível a avaliação sobre o crescimento da faixa de variação ΔT em função do FD% em cada caso avaliado.

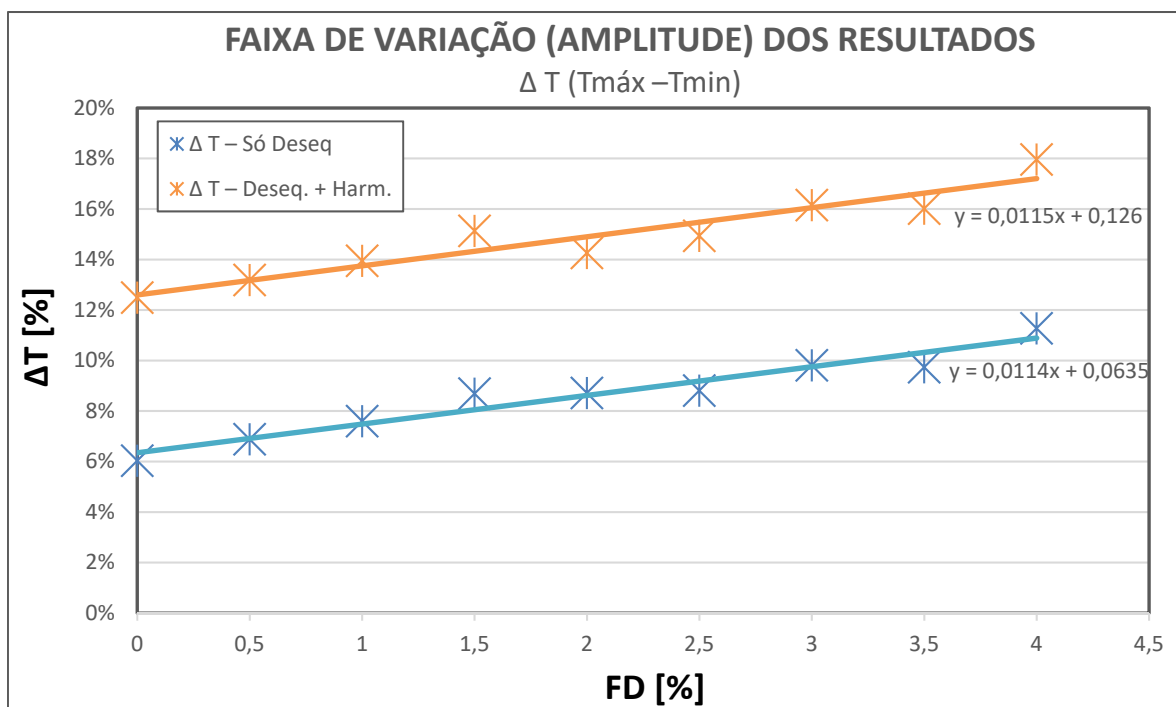


Figura 4.6 – Faixa de variação da temperatura a ocorrência só de desequilíbrio e de ambos os fenômenos simultâneos.

Verifica-se da Figura 4.6, conforme conclusões anteriores, que a amplitude dos resultados de temperatura é crescente em relação ao $FD\%$ em ambos os casos. Nota-se que a amplitude é sempre maior para os casos em que há a ocorrência simultânea dos fenômenos, em comparação aos casos em que há somente a presença do desequilíbrio de tensão. Por meio da observação das equações resultantes da regressão linear efetuada para cada conjunto de pontos, percebe-se que o coeficiente angular é aproximadamente igual entre as duas retas. Esse fato permite a conclusão de que a presença de condições com ambos os fenômenos concomitantes aumenta a faixa de variação dos resultados para a temperatura, porém não altera a taxa de crescimento dessa amplitude em função do $FD\%$.

4.6 – ANÁLISE DA COMPARAÇÃO DOS EFEITOS – CASO SELECIONADO

Esta seção tem por objetivo efetuar a avaliação das decorrências da aplicação concomitante dos distúrbios em comparação ao resultado da superposição dos efeitos relacionados aos fenômenos de forma individualizada. Os critérios e a metodologia para a realização dessa análise foram descritos no item 3.5.5. Como resultado, é formada a seleção de condições exposta na Tabela 4.3. Os valores destacados em vermelho se referem às condições para as quais a soma dos efeitos individuais (Coluna F) é inferior ao resultado verificado quando da aplicação conjunta dessas mesmas condições (Coluna G).

Tabela 4.3 – Seleção de valores dos Bancos de Dados que atendem aos critérios

$$FD\% = 2\% \text{ e } DTT\% = 5\%.$$

T% Só Desequilíbrio [%]	T% Só Harmônicas [%]	T% Ambos os Fenômenos [%]	Soma Efeitos Individuais Relativos	Efeito Relativo Simultâneos
A	B	C	F = (A+B) - 200%	G = C - 100%
101,10	98,60	98,70	-0,30	-1,30
99,90	98,10	99,00	-2,00	-1,00
107,40	98,10	100,10	5,50	0,10
105,80	98,60	100,70	4,40	0,70
105,90	100,70	100,80	6,60	0,80
101,30	98,40	101,50	-0,30	1,50
105,10	98,40	102,30	3,50	2,30
103,90	98,40	102,90	2,30	2,90
102,10	98,40	103,90	0,50	3,90
102,90	98,10	105,50	1,00	5,50

Observa-se que a ocorrência simultânea de ambos os fenômenos pode culminar em um agravamento das condições térmicas do motor. Isso se verifica na medida em que a temperatura para certas condições atinge valores acima do esperado quando do funcionamento da máquina sob condições que obedecem aos limites normativos de cada distúrbio separadamente.

Para a metade dos casos da Tabela 4.3, ainda que os distúrbios se apresentem individualmente dentro dos seus respectivos limites normativos ($FD\% = 2\%$ e $DTT\% = 5\%$), a elevação de temperatura para a ocorrência conjunta de desequilíbrio e harmônicas é maior do que a verificada pela superposição da contribuição de cada fenômeno separadamente.

A mesma verificação exposta no parágrafo anterior foi realizada para as temperaturas de todas as 27.842 condições que envolvem ambos os fenômenos concomitantemente. O resultado obtido revela que, em 64,5 % das condições de entrada, a soma dos efeitos individuais é inferior ao resultado verificado quando da aplicação conjunta dessas mesmas condições. Para esses casos, observou-se uma diferença média de temperatura de 2,52% entre as condições com a ocorrência simultânea e a soma dos resultados para os fenômenos aplicados separadamente, sendo maior no primeiro caso. O desvio padrão verificado nessas condições foi de 3,37%, com valores para a diferença variando entre 0 % e 14,92 %.

Conclui-se que a avaliação em separado dos limites recomendados para o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica pode não representar de forma fidedigna o que ocorre na temperatura do motor quando estes distúrbios se manifestam simultaneamente.

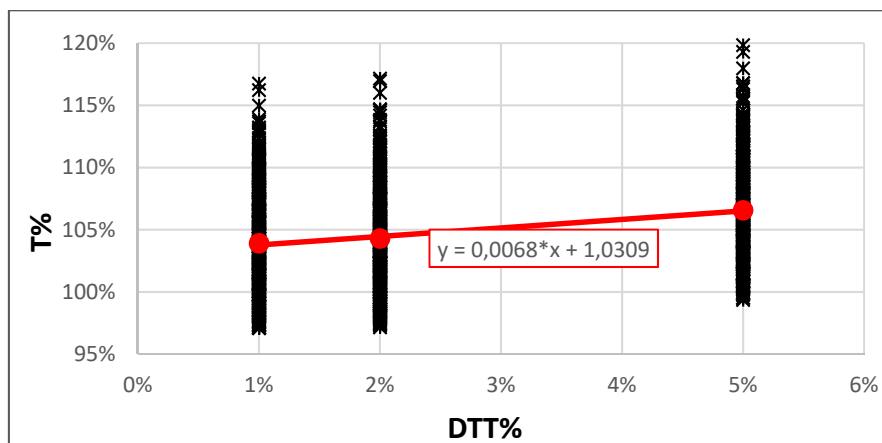
4.7 - DESEMPENHO DOS INDICADORES DE QEE PROPOSTOS

Os resultados apresentados nas seções anteriores deste capítulo culminaram na verificação da ineficiência da utilização do $FD\%$ e, principalmente, da $DTT\%$, para relacionar a quantificação do distúrbio ao aumento da temperatura do MIT. Este item realiza a avaliação dos resultados obtidos para o emprego de duas metodologias que consideram a quantificação do desequilíbrio de tensão e das distorções harmônicas conjuntamente, conforme descrito na seção 3.5.6.

4.7.1 – Indicador pela regressão dos pontos médios

Para a quantificação da ocorrência concomitante de ambos os fenômenos por meio da regressão dos resultados dos bancos de dados deste trabalho, optou-se neste item pela ponderação dos casos envolvendo a 2ª ordem harmônica separadamente. Isso se deve ao fato de que os resultados apresentados neste capítulo conduziram à verificação de que os casos com a presença dessa ordem harmônica, de forma isolada ou associada a outras ordens, são aqueles que culminam em aumentos mais significativos da temperatura do MIT. Dessa forma, propõe-se que essas condições tenham peso diferenciado em relação às demais, quando da elaboração do índice.

A Figura 4.7a apresenta o gráfico da temperatura em função da DTT% e a equação da regressão linear que melhor se adequou aos pontos. O referido gráfico considera somente os casos que envolvem desequilíbrio e 2ª harmônica, ou desequilíbrio, 2ª harmônica e mais uma outra ordem qualquer. A Figura 4.7b mostra os pontos que relacionam a temperatura ao *FD%*, e sua regressão, considerando todos os casos dos bancos de dados. Para o gráfico da Figura 4.7b, a regressão polinomial de segunda ordem se adequou aos pontos de forma mais eficiente do que uma regressão linear.



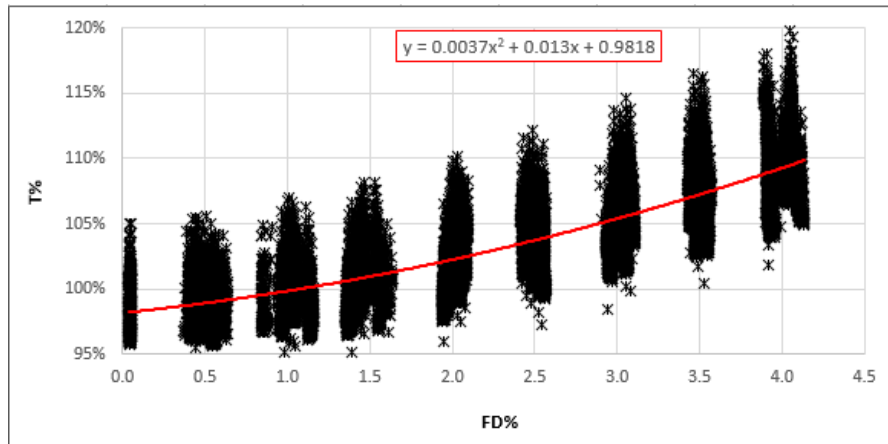


Figura 4.7 a) Temperatura em função da DTT%, para as condições que envolvem a 2ª harmônica. b) Temperatura em função do $FD\%$: todos os casos.

O mesmo procedimento de obtenção da equação da regressão das temperaturas em função da $DTT\%$ para condições que não envolvem a 2ª ordem harmônica ($DTT\%_{demais\ ordens}$) foi empregado, obtendo-se o valor pouco representativo de 0,0003 para o coeficiente angular da reta.

Com base no equacionamento obtido para as regressões mostradas nas Figuras 4.7a e 4.7b, bem como do coeficiente angular referente a $DTT\%_{demais\ ordens}$, procede-se a normalização dos valores do eixo x em relação ao $FD\%$, que varia de 0 % a 4,5 %. Multiplica-se, portanto, as expressões pelo fator 6,88, de maneira que os gráficos para ambos os indicadores possam ser comparados em uma mesma base. Dessa forma, obtém-se a expressão do indicador das regressões $I_r\%$ conforme mostrado pela equação (4.1):

$$I_r\% = 6,88 \cdot (0,0037 \cdot FD\%^2 + 0,13 \cdot FD\% + 0,0068 \cdot DTT\%_{2\ ordem} + 0,0003 \cdot DTT\%_{demais\ ordens}) \quad (4.1)$$

A Figura 4.8 mostra a temperatura em função dos indicadores $FD\%$ e $I_r\%$.

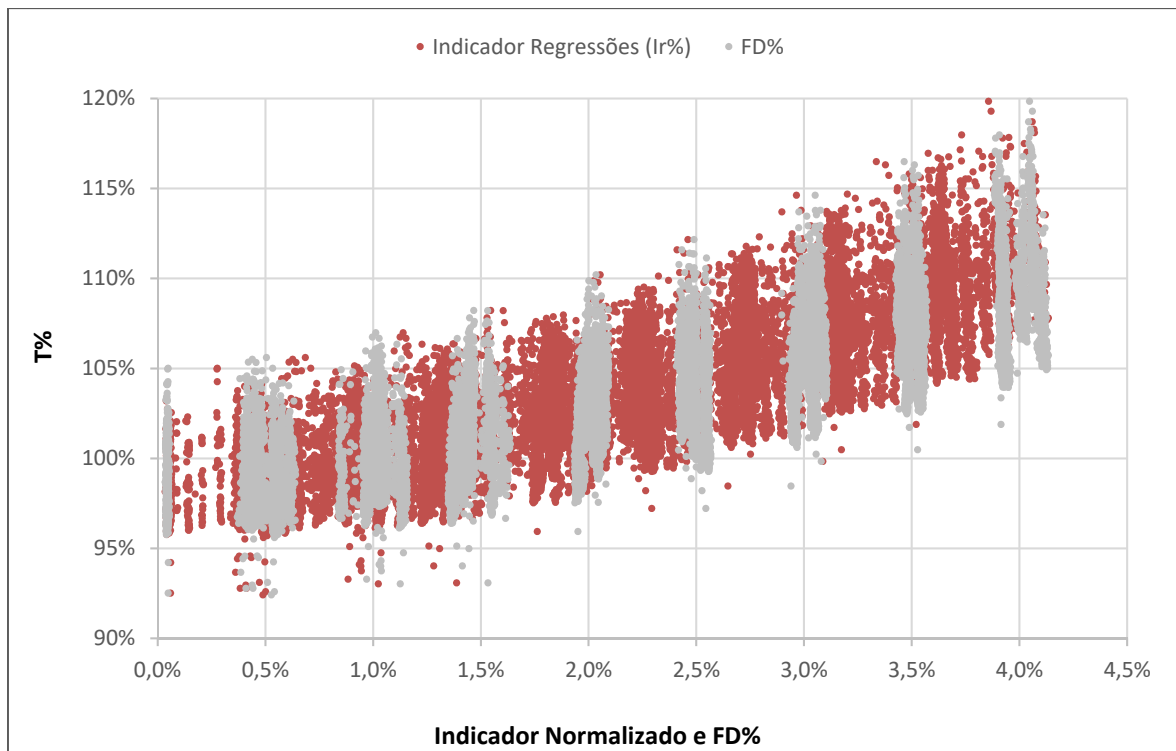


Figura 4.8 Temperatura em função do Indicador Regressões normalizado e do $FD\%$.

A Figura 4.8 mostra que o indicador $I_r\%$ normalizado não apresentou melhorias quanto à faixa de variação ΔT ($T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}$), na medida em que os valores mínimo e máximo desse indicador são equivalentes aos apresentados pelo $FD\%$ ao longo do eixo das abcissas.

Por outro lado, o $I_r\%$ apresentou diferenças em relação ao $FD\%$ quando se observa a dispersão dos pontos. Nota-se que o indicador da regressoes proporciona um espalhamento maior dos valores quando comparados aos pontos do $FD\%$, que se mostram mais concentrados em torno de valores pontuais.

Dado o fato já verificado de que o $FD\%$ individualmente não se apresenta como um indicador eficiente para quantificar os efeitos na temperatura do MIT, o indicador proposto $I_r\%$, por considerar o Fator de Desequilrio com um peso maior na sua composição, transmitiu aos seus resultados uma faixa de variação dos valores de saída semelhante  obtida no primeiro caso. Conclui-se, portanto, que o uso do indicador proveniente das regressoes dos pontos de temperatura ponderados pelo $FD\%$ e pela $DTT\%$ não culmina em ganho de eficiência. Isso decorre do fato de que não se verificou redução significativa na faixa de variação entre os valores mínimo e máximo de temperatura em função do indicador, ainda que o uso de $I_r\%$ tenha culminado em maior dispersão dos pontos.

4.7.2 – Indicador baseado em parâmetros provenientes da transformada dq0

O trabalho (Duarte, 2010) desenvolveu o indicador $FDu\%$, que comporta as influências do desequilíbrio e das harmônicas na temperatura do motor mediante o uso da Transformada de Park (dq0) nos sinais de tensão de entrada. A equação 3.21, apresentada no capítulo 3, apresenta a metodologia de cálculo do indicador proposto pelo autor. Aplicando-se a transformada dq0 aos valores do banco de dados contendo os fenômenos concomitantemente, e procedendo-se a normalização dos valores no eixo das abcissas em relação ao $FDu\%$, são obtidos os gráficos mostrados nas Figura 4.9a, 4.9b:

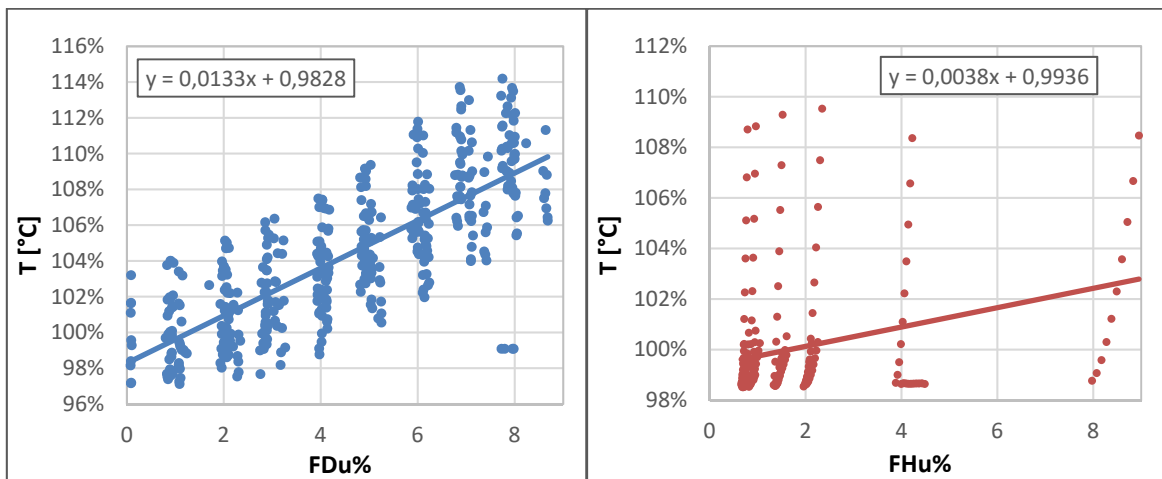


Figura 4.9 a) Temperatura em função do Indicador $FDu\%$. b) Temperatura em função do Indicador $FHu\%$.

Os gráficos mostrados nas Figuras 4.9a e 4.9b permitem a verificação, da mesma forma como constatado anteriormente para os demais indicadores avaliados neste trabalho, de um comportamento crescente, em média, da temperatura em relação ao índice de desequilíbrio. Para o índice de harmônicas, não se observa uma tendência evidente.

Com base no equacionamento obtido para as regressões mostradas nas Figuras 4.9a e 4.9b, e na estimação dos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 da equação 3.21, procede-se a normalização dos valores do eixo x em relação ao $FD\%$. Dessa forma, obtém-se a expressão do indicador $FQu\%$ conforme mostrado pela equação 4.2:

$$FQu\% = 0,67 \cdot (0,00665 \cdot FDu\% + 0,0038FHu\% - 0,03) \quad (4.2)$$

A Figura 4.8 mostra a temperatura em função dos indicadores $FQu\%$ e $FD\%$.

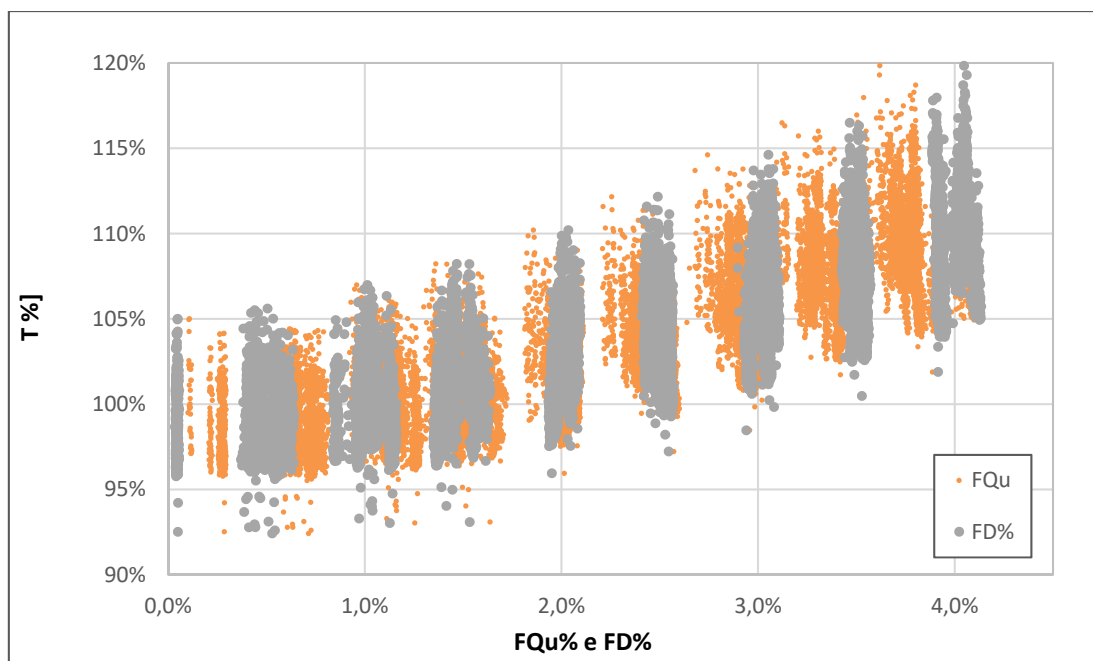


Figura 4.10 a) Temperatura em função do $FQu\%$ normalizado e do $FD\%$.

A observação do gráfico mostrado na Figura 4.10 evidencia que, assim como constatado para o indicador das regressões $I_r\%$, não há redução na faixa de variação das temperaturas. Conclui-se, portanto, a inexistência de significativa melhora na eficiência desse indicador para a representação das temperaturas nos casos aqui representados.

4.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os resultados que permitiram a descrição do comportamento da temperatura de operação do MIT quando submetido aos distúrbios de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica aplicados individualmente e concomitantemente.

Inicialmente, foram apresentados os resultados para a aplicação individual do desequilíbrio de tensão sobre o motor. Observou-se que a temperatura de operação média se comporta de forma crescente em relação ao $FD\%$. Constatou-se a existência, para um mesmo valor de $FD\%$, de diversas condições de desequilíbrio culminando em diferentes temperaturas.

Finalmente, conclui-se que essa faixa de variação aumenta com o crescimento do $FD\%$, de forma que a utilização desse indicador para mensurar os efeitos do referido distúrbio na temperatura do MIT se torna menos eficiente à medida que seu valor se eleva.

Da mesma forma, foram descritos os resultados encontrados para a aplicação sobre o MIT de condições contendo individualmente o fenômeno da distorção harmônica. Foi possível observar que o aumento na intensidade da $DIT_h\%$ resulta em uma elevação na temperatura. No entanto, essa elevação se mostra muito discreta em boa parte dos resultados avaliados, sendo as condições contendo a presença da harmônica de ordem 2 aquelas que resultaram em efeitos mais significativos na temperatura da máquina. Na ocorrência das demais ordens harmônicas, a temperatura de operação se apresentou abaixo do valor nominal na maioria das condições.

Ao se observar os resultados da aplicação individual desses fenômenos, observou-se que, de uma forma geral, os efeitos sobre a temperatura de operação do MIT causados pelo desequilíbrio de tensão têm impacto mais significativo do que aqueles observados quando da aplicação de condições contendo somente distorção harmônica.

Efetuada as avaliações dos efeitos individuais dos distúrbios, foi realizada a apresentação dos resultados para a aplicação de condições contendo ambos os fenômenos simultaneamente. Verificou-se que a inserção de distorção harmônica a condições que contém desequilíbrio de tensão resultou em uma redução na temperatura média de operação da ordem de 1%, porém, aumentou a faixa de variação dos resultados para um mesmo valor de $FD\%$. Verificou-se que a amplitude dos resultados de temperatura é crescente em relação ao $FD\%$ em ambos os casos, sendo sempre maior quando da ocorrência simultânea dos distúrbios. Observou-se ainda que o $FD\%$ possui influência no aumento de temperatura do motor, enquanto que, para condições com ocorrência concomitante, a $DTT\%$ não foi capaz de representar com clareza o comportamento deste parâmetro.

Concluiu-se que a ocorrência simultânea de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica pode culminar em um agravamento das condições operativas do motor, na medida em que, para 64,5% das condições com a ocorrência concomitante dos distúrbios, a temperatura atinge valores acima daqueles apresentados quando se consideram os fenômenos de forma individualizada.

Por fim, foram avaliados o desempenho de duas propostas de indicadores que ponderam os efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica no seu cálculo, baseado nos resultados obtidos para a temperatura do MIT. As avaliações mostraram que não houve significativa melhoria na eficiência da representação da temperatura por nenhuma das duas metodologias avaliadas. Observou-se, porém, melhoria na dispersão dos pontos, que passaram a ser menos concentrados em valores discretos no eixo das abcissas.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - CONCLUSÕES

Este capítulo visa apresentar uma síntese dos principais resultados verificados em toda a dissertação. Além disso, são sugeridas propostas de trabalhos futuros que podem proporcionar continuidade a esta pesquisa.

Este estudo se propôs a realizar a análise da influência dos distúrbios de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica sobre as temperaturas do MIT aplicados de forma individual e simultânea, com base em resultados experimentais e computacionais.

De forma a contextualizar o tema, o Capítulo 1 apresentou a introdução geral às matérias tratadas na dissertação. Os principais trabalhos relacionados ao tema em questão foram elencados no item Estado da Arte. A análise dos procedimentos e resultados apresentados por esses autores permitiu a identificação de possibilidades de estudos adicionais sobre o comportamento da temperatura de operação o MIT quando submetido a desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, tal como proposto para esta dissertação. Em seguida, foram estabelecidos os objetivos gerais e específicos do trabalho.

O Capítulo 2 prestou-se à apresentação da fundamentação teórica necessária ao entendimento conceitual dos fenômenos analisados. Foram abordadas as suas diferentes, causas e efeitos, métodos para o cálculo dos indicadores e principais normas. Em seguida foi explanada a fundamentação utilizada para o desenvolvimento da modelagem térmica para o motor de indução escolhida.

O Capítulo 3 prestou-se para a exibição da infraestrutura laboratorial e métodos empregados para se alcançar com êxito os objetivos propostos. Foi detalhado o modelo térmico selecionado para a obtenção dos resultados para a temperatura de operação do MIT, bem como descritos os procedimentos adotados para efetuar a sua validação em laboratório. O capítulo apresentou, ainda, uma descrição dos critérios adotados para a elaboração dos valores que compõem os bancos de dados utilizados nos ensaios laboratoriais e aplicados ao

modelo térmico computacional. Por fim, foi explanada a metodologia utilizada para a apresentação dos resultados e efetivação das análises pertinentes.

O Capítulo 4 expôs os principais resultados identificados com a execução desta pesquisa. Inicialmente, foram apresentados os resultados para a aplicação individual do desequilíbrio de tensão sobre o motor. Observou-se que a temperatura de operação média se comporta de forma crescente em relação ao $FD\%$. Constatou-se a existência, para um mesmo valor de $FD\%$, de diversas condições de desequilíbrio culminando em diferentes temperaturas e concluiu-se que essa faixa de variação aumenta com o crescimento do $FD\%$, de forma que a utilização desse indicador para mensurar os efeitos do referido distúrbio na temperatura do MIT se torna menos eficiente à medida que seu valor se eleva.

Em seguida foram descritos os resultados encontrados para a aplicação sobre o MIT de condições contendo individualmente o fenômeno da distorção harmônica. Foi possível observar que o aumento na intensidade da $DIT_h\%$ resulta em uma elevação na temperatura, no entanto, essa elevação se mostra muito discreta em boa parte dos resultados avaliados, sendo as condições que contém a presença da harmônica de ordem 2 aquelas que resultaram em efeitos mais significativos na temperatura da máquina. Na ocorrência das demais ordens harmônicas, a temperatura de operação se apresentou abaixo do valor nominal na maioria dos casos.

Ao se observar os resultados da aplicação individual desses fenômenos, observou-se que, de uma forma geral, os efeitos sobre a temperatura de operação do MIT causados pelo desequilíbrio de tensão têm impacto mais significativo do que aqueles observados quando da aplicação de condições contendo somente distorção harmônica.

Em relação aos resultados para a aplicação concomitante dos distúrbios, esse capítulo mostrou que a inserção de distorção harmônica a condições que contém desequilíbrio de tensão resultou em uma redução na temperatura média de operação da ordem de 1%, porém, aumentou a faixa de variação dos resultados para um mesmo valor de $FD\%$. Foi verificado que a amplitude dos resultados de temperatura é crescente em relação ao $FD\%$ em ambos os casos, sendo sempre maior quando da ocorrência simultânea dos distúrbios. Observou-se ainda que o $FD\%$ possui influência no aumento de temperatura do motor, enquanto que, para

condições com ocorrência concomitante, a $DTT\%$ não foi capaz de representar com clareza o comportamento deste parâmetro.

Foi possível concluir que a ocorrência simultânea de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica pode culminar em um agravamento das condições operativas do motor, na medida em que, para 64,5% das condições com a ocorrência concomitante dos distúrbios, a temperatura atinge valores acima daqueles apresentados quando se consideram os fenômenos de forma individualizada.

Por fim, foi avaliado o desempenho de dois indicadores alternativos que ponderam os efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica no seu cálculo, baseado nos resultados obtidos para a temperatura do MIT. O primeiro indicador foi proposto neste trabalho com base na regressão das curvas dos valores médios ponderados para cada fenômeno. O segundo indicador avaliado foi proposto em trabalhos anteriores e considera parâmetros obtidos pela transformação de *Park* das condições de entrada. As avaliações mostraram que não houve significativa melhoria na eficiência da representação da temperatura por nenhuma das duas metodologias avaliadas. Foi observado, porém, uma melhoria na dispersão dos pontos, que passaram a ser menos concentrados em valores discretos no eixo das abcissas.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi possível observar, no decorrer das investigações realizadas neste trabalho, que algumas análises adicionais podem ser realizadas de forma a contribuir ou dar continuidade à pesquisa. Neste sentido, são pontadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Executar a metodologia computacional utilizada neste trabalho para se avaliar outras grandezas do MIT tais como torque, rendimento e ruído audível quando submetido a desequilíbrio de tensão e distorção harmônica concomitantemente;
- Desenvolver um indicador capaz de representar com mais eficiência que o $FD\%$ as consequências da ocorrência simultânea de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, considerando os diferentes efeitos que cada ordem deste fenômeno proporciona à máquina;

- Propor o uso de novos limites normativos para a ocorrência simultânea dos distúrbios de forma a representar os efeitos na temperatura de máquinas rotativas, em especial o MIT;
- Averiguar os efeitos da temperatura obtidos por meio da aplicação conjunta de desequilíbrio e harmônicas na redução vida útil do MIT, avaliando seus impactos econômicos no setor industrial;
- Comparar os resultados aqui obtidos com novos valores oriundos da utilização de motores com diferentes potências e aspectos construtivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. P. G., Emanuel, A. E., (2002). “Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost” [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(1), 12-20.
- ALMEIDA, M.L. (2013) “Avaliação da Temperatura do Motor de Indução Trifásico Submetido a Desequilíbrios de Tensão.” Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- ANEEL (2011) “Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.” *Nota Técnica n° 0029/2011-SRD/ANEEL*.
- ANEEL (2017). “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.” Módulo 8 (Revisão 10) – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em www.aneel.gov.br.
- BENETELI, T. A. P. (2015). “Método para limitação de índices de desequilíbrio de máquinas elétricas trifásicas em sistemas de distribuição.” Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.
- BRAGA, Laura Caixeta (2007) “Estudo de Aspectos de Eficiência Energética de Edificações com uma Abordagem de Automação Predial”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- BRITO, C. M. D., & Leão, R. P. S. (2006). “Desempenho de um motor de indução trifásico submetido a distorções harmônicas na tensão de alimentação. ” *SBSE–Simpócio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 1-6.
- CHOWDHURY, S. K., & BASKI, P. K. (2010). “A simple lumped parameter thermal model for electrical machine of TEFC design.” In *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on* (pp. 1-7). IEEE.
- DONOLO, P., Bossio, G., De Angelo, C., García, G., & Donolo, M. (2016). “Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations.” *Electric Power Systems Research, Elsevier*, 140, 866-873.
- DUARTE, S. X., & Kagan, N. (2010). “A power-quality index to assess the impact of voltage harmonic distortions and unbalance to three-phase induction motors. ” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3), 1846-1854.
- DUGAN, R. C.; Mcgranaghan, M. F.; Beaty, H. W.(1996) “Electrical Power Systems Quality”, 2nd ed. New York, NY, USA: The McGraw - Hill Companies.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energetica (2016), “NOTA TÉCNICA DEA 13/15 – Demanda de Energia 2050”, Plano Nacional de Energia 2050, disponível em www.epe.gov.br.
- FAIZ, J., Ebrahimpour, H. (2005) “Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages.” Publicado em: *Conference Record of the 2005: Industry Applications Conference; Fourtieth IAS Annual Meeting*, vol. 1, p. 485-491.

- FERREIRA FILHO, A. L. (2008). “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão.” Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-024/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.
- FERREIRA FILHO, A. L., Cormane, J. A. A., Garcia, D. C., Costa, M. V. C., Oliveira, M. A. G., & do Nascimento, F. A. (2010). “Analysis of the complex voltage unbalance factor behavior resulting from the variation of voltage magnitudes and angles.” In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 14th International Conference on (pp. 1-7). IEEE.
- GNACINSKI, P. (2008a). “Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine.” *Energy Conversion and Management, Elsevier*, 49(4), 761-770.
- GNACINSKI, P. (2008b). “Prediction of windings temperature rise in induction motors supplied with distorted voltage.” *Energy Conversion and Management, Elsevier*, 49(4), 707-717.
- KAWAPHARA, M. K., VASCONCELLOS, A. B., APOLÔNIO, R., TECHI, D. A. V., ARANTES, R. B., SILVA, R. P. B. e LIMA, R. L. (2008). “Análise do comportamento da energia elétrica no acionamento de uma bomba centrífuga em função da variação da vazão através do estrangulamento de uma válvula ou via inversor de frequência”. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, Brasil.
- JANNUZI, A. C. “Regulação da qualidade de energia elétrica sob o foco do consumidor. ” 2007. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade de Brasília, 2007.
- JESUS, N. C. (2007) “Monitoramento e Simulação de Motores sob Condições Não-Ideais: Efeito Combinado Desequilíbrio e Distorção Harmônica” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- LEE, C. Y., W. J., Wang, Y. N., & Gu, J. C. (1998). “Effects of voltage harmonics on the electrical and mechanical performance of a three-phase induction motor.” In *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1998 IEEE* (pp. 88-94). IEEE.
- LEE, C. Y. (1999) “Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor.” Publicado em: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, n° 2, p. 202–208.
- JESUS, N. C. (2007) “Monitoramento e Simulação de Motores sob Condições Não-Ideais: Efeito Combinado Desequilíbrio e Distorção Harmônica” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- NEMA (1987) Std. Publication MG1-1987.
- NETO, C. T. A (2012). “Análise de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Tensões de Alimentação Distorcidas” Monografia, Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

- NEVES, A. B. F. (2014). “Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um MIT. ” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM–579/2014, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153 p.
- ONS (2016). “Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica. ” Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8, disponível em www.ons.org.br.
- QUISPE, E. C., López-Fernández, X. M., Mendes, A. M., Cardoso, A. J. M., & Palacios, J. A. (2013). “Influence of the positive sequence voltage on the derating of three-phase induction motors under voltage unbalance. ” In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International* (pp. 100-105). IEEE
- REA, J. A., Herring, J., Sopoćko, M., Dempsey, P., & Armstrong, S. (2016). “Survey on demand side sensitivity to power quality in Ireland. ” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, 83, 495-504.
- RODRIGUES, J. E. (2009) “Interferência de Harmônicas em Equipamentos de Medição de Energia Elétrica” Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP.
- SANTOS, V. S., Felipe, P. R. V., Sarduy, J. R. G., Quispe, E. C., & Balbis, M. (2016). “Shaft Power Estimation in Induction Motor Operating Under Unbalanced and Harmonics Voltages.” *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2309-2315.
- SANTOS, V. S., Viego, P. R., Gómez, J. R., Quispe, E. C., & Balbis, M. (2015). “Estimating induction motor efficiency under no-controlled conditions in the presences of unbalanced and harmonics voltages.” In *Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015 CHILEAN Conference on* (pp. 567-572). IEEE.
- SILVA, M. D. C. (2014). “Análise da Influência das Componentes de Sequência Positiva, Negativa e Zero sobre as Temperaturas de um Motor de Indução Trifásico. ” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM – 558/2014, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p.
- CHAPMAN, D. (2005) “Qualidade de Energia – Harmônicos.” Schneider Electric Workshop, Instalações Elétricas de Baixa Tensão.
- SOUTO, O.C.N. (2001) “Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução sob Condições não Ideias de Alimentação. ” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- RADMEHR, M., Farhangi, S., & Nasiri, A. (2006). “Effects of power quality distortions on electrical drives and transformer life in paper industries: Simulations and real time measurements. ” In *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006. Conference Record of Annual* (pp. 1-9). IEEE.

APÊNDICE

A - VALORES CONSTANTES NOS BANCOS DE DADOS

A.1 – SOMENTE DESEQUILÍBRIO

Tabela A.1 – Condições com a presença somente de desequilíbrio de tensão.

# ID	Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	θ_b	θ_c	V ₁ [V]	V ₂ [V]	θ_2
1	131,4	139,4	131,4	-121,9	115,9	134,0	5,4	119,4
2	133,5	138,9	129,7	-123,3	116,2	134,0	5,4	94,2
3	135,8	137,6	128,8	-124,0	117,5	134,0	5,4	67,6
4	137,6	135,8	128,8	-123,7	118,8	134,0	5,2	47,3
5	138,9	133,5	129,7	-123,1	120,5	134,0	5,2	23,1
6	139,4	131,4	131,4	-122,1	121,8	134,0	5,3	1,1
7	131,7	138,7	131,7	-121,9	116,6	134,0	4,6	116,4
8	133,6	138,3	130,2	-122,9	116,9	134,0	4,7	92,0
9	135,5	137,2	129,4	-123,3	117,8	134,0	4,6	69,1
10	137,2	135,5	129,4	-123,4	119,1	134,0	4,7	44,9
11	138,3	133,6	130,2	-122,7	120,5	134,0	4,7	22,9
12	138,7	131,7	131,7	-121,8	121,8	134,0	4,7	-0,4
13	132,0	138,0	132,0	-121,6	116,9	134,0	4,1	118,2
14	133,6	137,7	130,8	-122,5	117,2	134,0	4,1	93,3
15	135,3	136,7	130,1	-123,0	117,8	134,0	4,1	71,3
16	136,7	135,3	130,1	-123,0	119,2	134,0	4,1	45,8
17	137,7	133,6	130,8	-122,4	120,5	134,0	4,1	21,9
18	138,0	132,0	132,0	-121,4	121,5	134,0	4,0	-0,6
19	132,4	137,4	132,4	-121,2	117,6	134,0	3,3	118,1
20	133,7	137,1	131,3	-121,9	117,9	134,0	3,3	93,2
21	135,1	136,3	130,7	-122,3	118,2	134,0	3,3	73,5
22	136,3	135,1	130,7	-122,3	119,2	134,0	3,3	48,3
23	137,1	133,7	131,3	-122,0	120,2	134,0	3,3	24,6
24	137,4	132,4	132,4	-121,4	121,2	134,0	3,4	1,3
25	132,7	136,7	132,7	-120,9	117,9	134,0	2,7	120,7
26	133,7	136,5	131,8	-121,6	118,2	134,0	2,7	93,9
27	134,9	135,8	131,4	-122,0	118,5	134,0	2,7	72,0
28	135,8	134,9	131,4	-122,0	119,5	134,0	2,8	45,4
29	136,5	133,7	131,8	-121,7	120,2	134,0	2,8	23,8
30	136,7	132,7	132,7	-121,0	120,9	134,0	2,6	1,4
31	133,0	136,0	133,0	-120,6	118,6	134,0	1,9	121,4
32	133,8	135,8	132,4	-121,3	118,6	134,0	2,0	94,4
33	134,6	135,4	132,0	-121,3	118,9	134,0	2,0	76,4
34	135,4	134,6	132,0	-121,3	119,6	134,0	1,9	47,5
35	135,8	133,8	132,4	-121,4	120,2	134,0	2,1	23,2
36	136,0	133,0	133,0	-120,7	120,6	134,0	1,8	1,6
37	133,3	135,3	133,3	-120,6	118,9	134,0	1,4	116,5
38	133,9	135,2	132,9	-120,6	118,9	134,0	1,4	104,5

39	134,4	134,9	132,7	-121,0	119,2	134,0	1,4	74,6
40	134,9	134,4	132,7	-121,0	119,6	134,0	1,3	51,5
41	135,2	133,9	132,9	-120,7	119,9	134,0	1,1	30,8
42	135,3	133,3	133,3	-120,7	120,6	134,0	1,5	2,0
43	133,7	134,7	133,7	-120,3	119,6	134,0	0,6	112,0
44	133,9	134,6	133,5	-120,4	119,6	134,0	0,6	93,4
45	134,2	134,4	133,3	-120,3	119,6	134,0	0,6	84,9
46	134,4	134,2	133,3	-120,3	119,9	134,0	0,6	47,7
47	134,6	133,9	133,5	-120,3	120,3	134,0	0,7	12,1
48	134,7	133,7	133,7	-120,3	120,3	134,0	0,7	2,3
49	134,0	134,0	134,0	-120,0	119,9	134,0	0,1	163,1
50	134,0	134,0	134,0	-120,0	119,9	134,0	0,1	156,3
51	136,2	128,5	128,5	-122,1	122,2	131,0	5,4	-0,1
52	135,8	130,6	126,8	-123,1	120,5	131,0	5,1	23,4
53	134,6	132,7	125,9	-123,7	118,8	131,0	5,1	47,0
54	132,7	134,6	125,9	-123,6	117,5	131,0	5,1	70,0
55	130,6	135,8	126,8	-123,3	116,2	131,0	5,3	93,9
56	128,5	136,2	128,5	-121,9	115,9	131,0	5,2	119,4
57	135,6	128,8	128,8	-121,8	121,8	131,0	4,6	-0,4
58	135,2	130,6	127,3	-122,7	120,5	131,0	4,6	22,8
59	134,1	132,5	126,5	-123,4	119,2	131,0	4,6	45,1
60	132,5	134,1	126,5	-123,3	117,8	131,0	4,6	68,8
61	130,6	135,2	127,3	-122,9	116,9	131,0	4,6	92,0
62	128,8	135,6	128,8	-121,9	116,6	131,0	4,5	116,4
63	134,9	129,1	129,1	-121,4	121,5	131,0	3,8	-0,6
64	134,6	130,6	127,8	-122,4	120,5	131,0	4,0	22,0
65	133,7	132,3	127,2	-123,0	119,2	131,0	4,0	45,8
66	132,3	133,7	127,2	-123,0	118,2	131,0	4,0	67,8
67	130,6	134,6	127,8	-122,3	117,2	131,0	3,9	96,1
68	129,1	134,9	129,1	-121,6	116,9	131,0	4,0	118,2
69	134,3	129,4	129,4	-121,4	121,2	131,0	3,3	1,2
70	134,0	130,7	128,4	-122,0	120,2	131,0	3,3	24,6
71	133,2	132,0	127,8	-122,3	119,2	131,0	3,2	48,1
72	132,0	133,2	127,8	-122,3	118,2	131,0	3,2	73,7
73	130,7	134,0	128,4	-121,9	117,6	131,0	3,3	97,0
74	129,4	134,3	129,4	-121,2	117,6	131,0	3,2	118,1
75	133,6	129,7	129,7	-121,0	120,9	131,0	2,6	1,4
76	133,4	130,8	128,9	-121,7	120,2	131,0	2,7	24,4
77	132,8	131,8	128,4	-122,0	119,5	131,0	2,7	44,4
78	131,8	132,8	128,4	-122,0	118,9	131,0	2,6	67,3
79	130,8	133,4	128,9	-121,6	118,2	131,0	2,6	93,5
80	129,7	133,6	129,7	-120,9	117,9	131,0	2,7	120,9
81	133,0	130,0	130,0	-120,7	120,9	131,0	2,1	-2,0
82	132,8	130,8	129,4	-121,4	120,2	131,0	2,1	23,1
83	132,3	131,6	129,1	-121,3	119,5	131,0	1,9	48,2
84	131,6	132,3	129,1	-121,3	118,9	131,0	1,9	75,9

85	130,8	132,8	129,4	-121,3	118,6	131,0	2,0	94,3
86	130,0	133,0	130,0	-120,6	118,6	131,0	1,9	121,4
87	132,3	130,3	130,3	-120,7	120,6	131,0	1,5	2,0
88	132,2	130,9	129,9	-120,7	120,2	131,0	1,3	21,0
89	131,9	131,4	129,7	-121,0	119,9	131,0	1,4	40,8
90	131,4	131,9	129,7	-121,0	119,2	131,0	1,3	74,7
91	130,9	132,2	129,9	-121,0	118,9	131,0	1,5	94,2
92	130,3	132,3	130,3	-120,6	118,9	131,0	1,4	116,3
93	131,7	130,7	130,7	-120,3	120,2	131,0	0,7	2,9
94	131,6	130,9	130,5	-120,3	120,3	131,0	0,7	11,5
95	131,4	131,2	130,4	-120,3	119,9	131,0	0,5	46,6
96	131,2	131,4	130,4	-120,3	119,6	131,0	0,6	86,3
97	130,9	131,6	130,5	-120,3	119,6	131,0	0,6	100,3
98	130,7	131,7	130,7	-120,3	119,6	131,0	0,6	111,8
99	131,0	131,0	131,0	-120,0	119,9	131,0	0,1	160,6
100	128,0	128,0	128,0	-120,0	119,9	128,0	0,1	151,9
101	128,6	127,7	127,7	-120,3	120,2	128,0	0,7	2,8
102	128,6	127,9	127,5	-120,3	120,2	128,0	0,7	12,2
103	128,4	128,2	127,4	-120,7	119,9	128,0	0,8	41,6
104	128,2	128,4	127,4	-120,7	119,6	128,0	0,7	69,4
105	127,9	128,6	127,5	-120,3	119,6	128,0	0,6	100,3
106	127,7	128,6	127,7	-120,3	119,6	128,0	0,6	110,4
107	129,3	127,4	127,4	-120,7	120,6	128,0	1,4	1,8
108	129,2	127,9	127,0	-120,7	120,2	128,0	1,2	19,9
109	128,9	128,4	126,7	-121,0	119,9	128,0	1,4	40,7
110	128,4	128,9	126,7	-121,0	119,2	128,0	1,3	74,6
111	127,9	129,2	127,0	-120,6	118,9	128,0	1,3	105,3
112	127,4	129,3	127,4	-120,6	118,9	128,0	1,3	116,5
113	129,9	127,1	127,1	-120,7	120,5	128,0	1,7	2,0
114	129,8	127,8	126,5	-121,0	120,2	128,0	1,8	21,4
115	129,3	128,6	126,1	-121,3	119,5	128,0	1,8	48,2
116	128,6	129,3	126,1	-121,3	118,9	128,0	1,9	75,6
117	127,8	129,8	126,5	-121,3	118,6	128,0	2,0	95,2
118	127,1	129,9	127,1	-120,6	118,6	128,0	1,8	121,5
119	130,6	126,7	126,7	-121,0	120,9	128,0	2,5	1,4
120	130,3	127,8	125,9	-121,7	120,2	128,0	2,6	24,8
121	129,7	128,8	125,5	-122,0	119,5	128,0	2,6	44,7
122	128,8	129,7	125,5	-122,0	118,9	128,0	2,6	66,8
123	127,8	130,3	125,9	-121,6	118,2	128,0	2,5	93,3
124	126,7	130,6	126,7	-120,9	117,9	128,0	2,6	121,0
125	131,2	126,4	126,4	-121,4	121,2	128,0	3,3	1,2
126	130,9	127,7	125,4	-122,0	120,2	128,0	3,2	24,8
127	130,2	129,0	124,9	-122,3	119,2	128,0	3,1	47,9
128	129,0	130,2	124,9	-122,3	118,2	128,0	3,2	73,9
129	127,7	130,9	125,4	-121,9	117,6	128,0	3,2	96,8
130	126,4	131,2	126,4	-121,3	117,6	128,0	3,1	118,1

131	131,8	126,1	126,1	-121,4	121,5	128,0	3,8	-0,6
132	131,5	127,7	124,9	-122,4	120,5	128,0	3,9	22,5
133	130,6	129,2	124,2	-123,0	119,2	128,0	4,0	45,7
134	129,2	130,6	124,2	-123,0	118,2	128,0	3,9	68,0
135	127,7	131,5	124,9	-122,3	117,2	128,0	3,8	95,6
136	126,1	131,8	126,1	-121,6	116,9	128,0	3,9	118,2
137	132,5	125,8	125,8	-121,8	121,8	128,0	4,5	-0,4
138	132,1	127,6	124,4	-122,7	120,5	128,0	4,5	22,7
139	131,0	129,5	123,6	-123,4	119,1	128,0	4,5	45,4
140	129,5	131,0	123,6	-123,3	117,8	128,0	4,5	68,6
141	127,6	132,1	124,4	-122,9	116,9	128,0	4,5	92,1
142	125,8	132,5	125,8	-121,9	116,6	128,0	4,4	116,5
143	133,1	125,5	125,5	-122,1	122,2	128,0	5,3	-0,2
144	132,7	127,6	123,9	-123,1	120,5	128,0	5,0	23,2
145	131,5	129,7	123,0	-123,7	118,8	128,0	5,0	47,0
146	129,7	131,5	123,0	-123,6	117,5	128,0	5,0	69,7
147	127,6	132,7	123,9	-123,3	116,2	128,0	5,2	94,0
148	125,5	133,1	125,5	-121,9	115,9	128,0	5,1	119,4
149	130,0	122,6	122,6	-122,1	122,2	125,0	5,1	-0,2
150	129,6	124,6	121,0	-123,1	120,5	125,0	4,9	23,2
151	128,4	126,6	120,1	-123,7	118,8	125,0	4,9	47,0
152	126,6	128,4	120,1	-123,6	117,5	125,0	4,9	69,9
153	124,6	129,6	121,0	-123,3	116,2	125,0	5,1	94,0
154	122,6	130,0	122,6	-121,9	115,9	125,0	5,0	119,4
155	129,4	122,9	122,9	-121,8	121,8	125,0	4,4	-0,3
156	129,0	124,6	121,5	-122,7	120,5	125,0	4,4	22,7
157	128,0	126,4	120,7	-123,4	119,1	125,0	4,4	44,9
158	126,4	128,0	120,7	-123,3	117,8	125,0	4,3	69,1
159	124,6	129,0	121,5	-122,9	116,9	125,0	4,4	92,1
160	122,9	129,4	122,9	-121,9	116,6	125,0	4,3	116,4
161	128,8	123,2	123,2	-121,4	121,5	125,0	3,7	-0,6
162	128,4	124,7	122,0	-122,4	120,5	125,0	3,8	22,3
163	127,5	126,2	121,3	-123,0	119,2	125,0	3,9	45,9
164	126,2	127,5	121,3	-123,0	118,2	125,0	3,8	67,8
165	124,7	128,4	122,0	-122,3	117,2	125,0	3,7	95,9
166	123,2	128,8	123,2	-121,6	116,9	125,0	3,8	118,2
167	128,1	123,5	123,5	-121,4	121,2	125,0	3,2	1,1
168	127,9	124,7	122,5	-122,0	120,2	125,0	3,1	24,5
169	127,1	126,0	121,9	-122,3	119,2	125,0	3,1	48,5
170	126,0	127,1	121,9	-122,3	118,2	125,0	3,1	73,4
171	124,7	127,9	122,5	-121,9	117,5	125,0	3,2	97,1
172	123,5	128,1	123,5	-121,3	117,6	125,0	3,0	118,1
173	127,5	123,8	123,8	-121,1	120,9	125,0	2,4	1,5
174	127,3	124,8	123,0	-121,7	120,2	125,0	2,6	24,4
175	126,7	125,8	122,6	-122,0	119,5	125,0	2,6	44,7
176	125,8	126,7	122,6	-122,0	118,9	125,0	2,5	67,1

177	124,8	127,3	123,0	-121,6	118,2	125,0	2,5	93,8
178	123,8	127,5	123,8	-120,9	117,9	125,0	2,5	120,8
179	126,9	124,1	124,1	-120,7	120,9	125,0	1,9	-1,9
180	126,7	124,8	123,5	-121,0	120,2	125,0	1,8	22,2
181	126,3	125,6	123,2	-121,3	119,5	125,0	1,8	47,9
182	125,6	126,3	123,2	-121,3	118,9	125,0	1,8	76,0
183	124,8	126,7	123,5	-121,3	118,6	125,0	1,9	94,5
184	124,1	126,9	124,1	-120,6	118,6	125,0	1,8	121,3
185	126,3	124,4	124,4	-120,7	120,6	125,0	1,4	1,9
186	126,1	124,9	124,0	-120,7	120,2	125,0	1,2	20,7
187	125,8	125,4	123,8	-121,0	119,9	125,0	1,3	41,4
188	125,4	125,8	123,8	-121,0	119,2	125,0	1,3	74,2
189	124,9	126,1	124,0	-120,6	118,9	125,0	1,3	104,8
190	124,4	126,2	124,4	-120,6	118,9	125,0	1,3	116,5
191	125,6	124,7	124,7	-120,3	120,2	125,0	0,7	2,3
192	125,6	124,9	124,5	-120,3	120,2	125,0	0,7	12,7
193	125,4	125,2	124,4	-120,3	119,9	125,0	0,5	46,8
194	125,2	125,4	124,4	-120,3	119,6	125,0	0,6	86,0
195	124,9	125,6	124,5	-120,3	119,6	125,0	0,6	100,2
196	124,7	125,6	124,7	-120,3	119,6	125,0	0,6	111,6
197	125,0	125,0	125,0	-120,0	119,9	125,0	0,1	162,6
198	122,0	122,0	122,0	-120,0	119,9	122,0	0,1	158,5
199	122,6	121,7	121,7	-120,3	120,2	122,0	0,7	2,9
200	122,6	121,9	121,5	-120,3	119,9	122,0	0,5	30,7
201	122,4	122,2	121,4	-120,3	119,9	122,0	0,5	47,6
202	122,2	122,4	121,4	-120,3	119,6	122,0	0,5	86,2
203	121,9	122,6	121,5	-120,3	119,6	122,0	0,6	100,0
204	121,7	122,6	121,7	-120,3	119,6	122,0	0,6	111,7
205	123,2	121,4	121,4	-120,7	120,6	122,0	1,4	2,0
206	123,1	121,9	121,0	-120,7	120,2	122,0	1,2	20,7
207	122,8	122,4	120,8	-121,0	119,9	122,0	1,3	41,3
208	122,4	122,8	120,8	-121,0	119,2	122,0	1,2	73,8
209	121,9	123,1	121,0	-121,0	118,9	122,0	1,3	94,5
210	121,4	123,2	121,4	-120,6	118,9	122,0	1,3	116,3
211	123,8	121,1	121,1	-120,7	120,5	122,0	1,7	1,6
212	123,7	121,8	120,5	-121,4	120,2	122,0	2,0	23,1
213	123,2	122,6	120,2	-121,3	119,5	122,0	1,8	48,6
214	122,6	123,2	120,2	-121,3	118,9	122,0	1,8	75,4
215	121,8	123,7	120,5	-121,3	118,6	122,0	1,9	94,8
216	121,1	123,8	121,1	-120,6	118,6	122,0	1,8	121,5
217	124,4	120,8	120,8	-121,1	120,9	122,0	2,4	1,4
218	124,2	121,8	120,0	-121,7	120,2	122,0	2,5	24,5
219	123,6	122,8	119,6	-122,0	119,5	122,0	2,5	45,3
220	122,8	123,6	119,6	-122,0	118,9	122,0	2,5	66,6
221	121,8	124,2	120,0	-121,6	118,2	122,0	2,4	93,4
222	120,8	124,4	120,8	-120,9	117,9	122,0	2,5	120,9

223	125,1	120,5	120,5	-121,4	121,2	122,0	3,1	1,3
224	124,8	121,7	119,5	-122,0	120,2	122,0	3,1	25,0
225	124,1	123,0	119,0	-122,3	119,2	122,0	3,0	48,3
226	123,0	124,1	119,0	-122,3	118,2	122,0	3,1	73,5
227	121,7	124,8	119,5	-121,9	117,5	122,0	3,1	96,9
228	120,5	125,0	120,5	-121,3	117,6	122,0	3,0	118,1
229	125,7	120,2	120,2	-121,4	121,5	122,0	3,6	-0,6
230	125,4	121,7	119,1	-122,4	120,5	122,0	3,7	22,1
231	124,5	123,2	118,4	-123,0	119,2	122,0	3,8	45,9
232	123,2	124,5	118,4	-123,0	118,2	122,0	3,7	67,7
233	121,7	125,4	119,1	-122,3	117,2	122,0	3,6	96,1
234	120,2	125,7	120,2	-121,6	116,9	122,0	3,7	118,1
235	126,3	119,9	119,9	-121,8	121,8	122,0	4,3	-0,3
236	125,9	121,6	118,6	-122,7	120,5	122,0	4,2	22,6
237	124,9	123,4	117,8	-123,4	119,1	122,0	4,3	45,1
238	123,4	124,9	117,8	-123,3	117,8	122,0	4,3	68,9
239	121,6	125,9	118,6	-123,0	116,9	122,0	4,3	92,2
240	119,9	126,3	119,9	-121,9	116,6	122,0	4,2	116,4
241	126,9	119,6	119,6	-122,1	122,2	122,0	5,0	-0,2
242	126,5	121,6	118,1	-123,1	120,5	122,0	4,8	23,1
243	125,3	123,6	117,2	-123,7	118,8	122,0	4,8	47,2
244	123,6	125,3	117,2	-123,6	117,5	122,0	4,8	69,8
245	121,6	126,5	118,1	-123,3	116,2	122,0	5,0	94,1
246	119,6	126,9	119,6	-121,9	115,9	122,0	4,9	119,5
247	123,8	116,7	116,7	-122,1	122,2	119,0	4,9	-0,2
248	123,4	118,6	115,2	-123,1	120,5	119,0	4,7	23,1
249	122,2	120,6	114,3	-123,7	118,8	119,0	4,7	47,5
250	120,6	122,2	114,3	-123,6	117,5	119,0	4,7	69,5
251	118,6	123,4	115,2	-123,3	116,2	119,0	4,8	94,2
252	116,7	123,8	116,7	-121,9	115,9	119,0	4,8	119,4
253	123,2	117,0	117,0	-121,8	121,8	119,0	4,2	-0,4
254	122,8	118,6	115,7	-122,7	120,5	119,0	4,1	22,5
255	121,8	120,4	114,9	-123,4	119,1	119,0	4,2	45,4
256	120,4	121,8	114,9	-123,3	117,8	119,0	4,1	68,7
257	118,6	122,8	115,7	-122,9	116,9	119,0	4,2	92,3
258	117,0	123,2	117,0	-121,9	116,6	119,0	4,1	116,3
259	122,6	117,3	117,3	-121,4	121,5	119,1	3,5	-0,5
260	122,3	118,7	116,1	-122,4	120,5	119,0	3,6	22,3
261	121,4	120,2	115,5	-123,0	119,1	119,0	3,7	46,1
262	120,2	121,4	115,5	-123,0	118,2	119,0	3,6	67,5
263	118,7	122,3	116,1	-122,3	117,2	119,0	3,6	95,9
264	117,3	122,6	117,3	-121,6	116,9	119,0	3,6	118,2
265	122,0	117,5	117,5	-121,4	121,2	119,0	3,0	1,4
266	121,7	118,7	116,6	-122,0	120,2	119,0	3,0	24,6
267	121,0	120,0	116,1	-122,3	119,2	119,0	2,9	48,7
268	120,0	121,0	116,1	-122,3	118,2	119,0	3,0	73,2

269	118,7	121,7	116,6	-121,9	117,5	119,0	3,0	97,0
270	117,5	122,0	117,5	-121,3	117,6	119,0	2,9	118,1
271	121,4	117,8	117,8	-121,0	120,9	119,0	2,3	1,4
272	121,2	118,8	117,1	-121,7	120,2	119,0	2,4	24,2
273	120,6	119,8	116,7	-122,0	119,5	119,0	2,5	45,0
274	119,8	120,6	116,7	-122,0	118,9	119,0	2,4	66,7
275	118,8	121,2	117,1	-121,6	118,2	119,0	2,4	94,0
276	117,8	121,4	117,8	-120,9	117,9	119,0	2,4	120,9
277	120,8	118,1	118,1	-120,7	120,9	119,0	1,9	-1,9
278	120,6	118,8	117,6	-121,0	120,2	119,0	1,7	21,7
279	120,2	119,6	117,3	-121,3	119,5	119,0	1,7	48,7
280	119,6	120,2	117,3	-121,3	118,9	119,0	1,7	75,6
281	118,8	120,6	117,6	-121,3	118,6	119,0	1,8	94,7
282	118,1	120,8	118,1	-120,6	118,6	119,0	1,7	121,3
283	120,2	118,4	118,4	-120,7	120,6	119,0	1,4	2,0
284	120,1	118,9	118,0	-120,7	120,2	119,0	1,2	20,8
285	119,8	119,4	117,8	-121,0	119,9	119,0	1,3	41,5
286	119,4	119,8	117,8	-121,0	119,2	119,0	1,2	74,1
287	118,9	120,1	118,0	-120,6	118,9	119,0	1,2	104,5
288	118,4	120,2	118,4	-120,6	118,9	119,0	1,2	116,5
289	119,6	118,7	118,7	-120,3	120,2	119,0	0,7	3,1
290	119,5	118,9	118,5	-120,3	120,2	119,0	0,6	13,3
291	119,4	119,2	118,4	-120,7	119,9	119,0	0,7	41,5
292	119,2	119,4	118,4	-120,7	119,6	119,0	0,7	68,9
293	118,9	119,5	118,5	-120,3	119,6	119,0	0,6	98,9
294	118,7	119,6	118,7	-120,3	119,6	119,0	0,6	111,4
295	119,0	119,0	119,0	-120,0	119,9	119,0	0,1	157,4
296	116,0	116,0	116,0	-120,0	119,9	116,0	0,1	154,1
297	116,6	115,7	115,7	-120,3	120,2	116,0	0,6	2,9
298	116,5	115,9	115,5	-120,3	120,3	116,0	0,6	13,9
299	116,4	116,2	115,4	-120,3	119,9	116,0	0,5	46,9
300	116,2	116,4	115,4	-120,3	119,6	116,0	0,5	81,3
301	115,9	116,5	115,5	-120,3	119,6	116,0	0,5	99,3
302	115,7	116,6	115,7	-120,3	119,6	116,0	0,5	112,4
303	117,2	115,4	115,4	-120,7	120,6	116,0	1,3	2,0
304	117,1	115,9	115,1	-120,7	120,2	116,0	1,1	19,8
305	116,8	116,4	114,9	-121,0	119,9	116,0	1,2	41,4
306	116,4	116,8	114,9	-121,0	119,2	116,0	1,2	74,4
307	115,9	117,1	115,1	-120,6	118,9	116,0	1,2	105,8
308	115,4	117,2	115,4	-120,6	118,9	116,0	1,2	116,7
309	117,7	115,1	115,1	-120,7	120,6	116,0	1,6	1,8
310	117,6	115,8	114,6	-121,0	120,2	116,0	1,6	21,9
311	117,2	116,5	114,3	-121,3	119,5	116,0	1,7	47,7
312	116,5	117,2	114,3	-121,3	118,9	116,0	1,7	76,7
313	115,8	117,6	114,6	-121,3	118,6	116,0	1,8	94,8
314	115,1	117,7	115,1	-120,6	118,6	116,0	1,7	121,4

315	118,3	114,9	114,9	-121,1	120,9	116,0	2,3	1,6
316	118,1	115,8	114,1	-121,7	120,2	116,0	2,4	24,6
317	117,6	116,7	113,7	-122,0	119,5	116,0	2,4	44,3
318	116,7	117,6	113,7	-122,0	118,9	116,0	2,3	67,3
319	115,8	118,1	114,1	-121,6	118,2	116,0	2,3	93,4
320	114,9	118,3	114,9	-120,9	117,9	116,0	2,3	120,9
321	118,9	114,6	114,6	-121,4	121,2	116,0	2,9	1,4
322	118,7	115,7	113,7	-122,0	120,2	116,0	2,9	24,2
323	118,0	116,9	113,2	-122,3	119,2	116,0	2,9	48,0
324	116,9	118,0	113,2	-122,3	118,2	116,0	2,9	73,9
325	115,7	118,7	113,7	-122,0	117,5	116,0	3,0	97,4
326	114,6	118,9	114,6	-121,3	117,6	116,0	2,8	118,1
327	119,5	114,3	114,3	-121,4	121,5	116,0	3,4	-0,6
328	119,2	115,7	113,2	-122,4	120,5	116,0	3,5	22,1
329	118,4	117,1	112,6	-123,0	119,2	116,0	3,6	45,5
330	117,1	118,4	112,6	-123,0	118,2	116,0	3,5	68,1
331	115,7	119,2	113,2	-122,3	117,2	116,0	3,5	96,0
332	114,3	119,5	114,3	-121,6	116,9	116,0	3,5	118,2
333	120,1	114,0	114,0	-121,8	121,8	116,0	4,1	-0,4
334	119,7	115,6	112,7	-122,7	120,5	116,0	4,1	22,7
335	118,8	117,3	112,0	-123,4	119,1	116,0	4,1	44,9
336	117,3	118,8	112,0	-123,3	117,8	116,0	4,0	69,2
337	115,6	119,7	112,7	-123,0	116,8	116,0	4,1	92,2
338	114,0	120,1	114,0	-121,9	116,6	116,0	4,0	116,4
339	120,6	113,8	113,8	-122,1	122,2	116,0	4,7	-0,2
340	120,3	115,6	112,3	-123,1	120,5	116,0	4,6	23,0
341	119,2	117,5	111,5	-123,7	118,8	116,0	4,6	46,9
342	117,5	119,2	111,5	-123,7	117,5	116,0	4,5	70,1
343	115,6	120,3	112,3	-123,3	116,2	116,0	4,7	94,2
344	113,8	120,6	113,8	-121,9	115,9	116,0	4,6	119,4
345	117,5	110,8	110,8	-122,1	122,2	113,0	4,7	-0,1
346	117,1	112,6	109,4	-123,1	120,5	113,0	4,4	23,2
347	116,1	114,5	108,6	-123,7	118,8	113,0	4,5	47,1
348	114,5	116,1	108,6	-123,7	117,5	113,0	4,4	69,9
349	112,6	117,1	109,4	-123,3	116,2	113,0	4,6	94,1
350	110,8	117,5	110,8	-121,9	115,9	113,0	4,5	119,4
351	117,0	111,1	111,1	-121,8	121,8	113,0	4,0	-0,3
352	116,6	112,7	109,8	-122,7	120,5	113,0	3,9	23,1
353	115,7	114,3	109,1	-123,3	119,1	113,0	4,0	45,2
354	114,3	115,7	109,1	-123,3	117,8	113,0	4,0	68,9
355	112,7	116,6	109,8	-123,0	116,8	113,0	4,0	91,8
356	111,1	117,0	111,1	-121,9	116,6	113,0	3,9	116,3
357	116,4	111,3	111,3	-121,4	121,5	113,0	3,3	-0,5
358	116,1	112,7	110,3	-122,4	120,5	113,0	3,4	22,0
359	115,3	114,1	109,7	-123,0	119,2	113,0	3,5	45,8
360	114,1	115,3	109,7	-123,0	118,2	113,0	3,4	67,9

361	112,7	116,1	110,3	-122,3	117,2	113,0	3,4	96,1
362	111,3	116,4	111,3	-121,6	116,9	113,0	3,5	118,2
363	115,8	111,6	111,6	-121,4	121,2	113,0	2,9	1,3
364	115,6	112,7	110,7	-122,1	120,2	113,0	2,8	24,5
365	114,9	113,9	110,2	-122,4	119,2	113,0	2,8	48,4
366	113,9	114,9	110,2	-122,3	118,2	113,0	2,8	73,4
367	112,7	115,6	110,7	-121,9	117,5	113,0	2,9	97,1
368	111,6	115,8	111,6	-121,3	117,6	113,0	2,8	118,0
369	115,3	111,9	111,9	-121,1	120,9	113,0	2,2	1,6
370	115,1	112,8	111,2	-121,7	120,2	113,0	2,3	24,0
371	114,5	113,7	110,8	-122,0	119,5	113,0	2,3	44,7
372	113,7	114,5	110,8	-122,0	118,9	113,0	2,3	66,9
373	112,8	115,1	111,2	-121,6	118,2	113,0	2,2	93,4
374	111,9	115,3	111,9	-120,9	117,9	113,0	2,3	120,9
375	114,7	112,2	112,2	-120,7	120,9	113,0	1,7	-1,8
376	114,6	112,8	111,6	-121,0	120,2	113,0	1,6	21,8
377	114,1	113,5	111,3	-121,3	119,5	113,0	1,6	48,2
378	113,5	114,1	111,3	-121,3	118,9	113,0	1,7	75,8
379	112,8	114,6	111,6	-121,3	118,6	113,0	1,8	94,8
380	112,2	114,7	112,2	-120,6	118,6	113,0	1,6	121,4
381	114,1	112,4	112,4	-120,7	120,6	113,0	1,3	1,7
382	114,0	112,9	112,1	-120,7	120,2	113,0	1,1	20,2
383	113,8	113,4	111,9	-121,0	119,9	113,0	1,2	41,0
384	113,4	113,8	111,9	-121,0	119,2	113,0	1,2	74,1
385	112,9	114,0	112,1	-120,8	119,0	113,0	1,2	95,2
386	112,4	114,1	112,4	-120,6	118,9	113,0	1,2	116,3
387	113,6	112,7	112,7	-120,3	120,2	113,0	0,6	2,6
388	113,5	112,9	112,5	-120,3	119,9	113,0	0,5	32,0
389	113,4	113,2	112,4	-120,3	119,9	113,0	0,5	47,4
390	113,2	113,4	112,4	-120,3	119,6	113,0	0,5	85,5
391	112,9	113,5	112,5	-120,3	119,6	113,0	0,5	99,5
392	112,7	113,6	112,7	-120,3	119,6	113,0	0,5	112,1
393	113,0	113,0	113,0	-120,0	119,9	113,0	0,0	163,4
394	110,0	110,0	110,0	-120,0	119,9	110,0	0,0	155,2
395	110,6	109,7	109,7	-120,3	120,2	110,0	0,6	3,1
396	110,5	109,9	109,6	-120,3	120,2	110,0	0,6	11,7
397	110,4	110,2	109,5	-120,3	119,9	110,0	0,5	46,4
398	110,2	110,4	109,5	-120,3	119,6	110,0	0,5	87,0
399	109,9	110,5	109,6	-120,3	119,6	110,0	0,5	101,2
400	109,7	110,6	109,7	-120,3	119,6	110,0	0,5	112,2
401	111,1	109,5	109,5	-120,4	120,6	110,0	1,1	-3,5
402	111,0	109,9	109,1	-120,7	120,2	110,0	1,1	19,9
403	110,7	110,3	108,9	-121,0	119,9	110,0	1,2	41,0
404	110,3	110,7	108,9	-121,0	119,2	110,0	1,1	74,4
405	109,9	111,0	109,1	-120,6	118,9	110,0	1,1	104,8
406	109,5	111,1	109,5	-120,6	118,9	110,0	1,1	116,6

407	111,7	109,2	109,2	-120,7	120,6	110,0	1,5	1,6
408	111,5	109,8	108,7	-121,4	120,2	110,0	1,8	22,6
409	111,1	110,5	108,4	-121,3	119,5	110,0	1,6	48,2
410	110,5	111,1	108,4	-121,3	119,0	110,0	1,6	73,1
411	109,8	111,5	108,7	-121,3	118,6	110,0	1,7	95,1
412	109,2	111,7	109,2	-120,6	118,6	110,0	1,6	121,5
413	112,2	108,9	108,9	-121,1	120,9	110,0	2,2	1,3
414	112,0	109,8	108,2	-121,7	120,2	110,0	2,3	24,3
415	111,5	110,7	107,8	-122,0	119,5	110,0	2,3	44,8
416	110,7	111,5	107,8	-122,0	118,9	110,0	2,2	67,0
417	109,8	112,0	108,2	-121,6	118,2	110,0	2,2	93,6
418	108,9	112,2	108,9	-120,9	117,9	110,0	2,3	120,9
419	112,8	108,7	108,7	-121,4	121,2	110,0	2,8	1,2
420	112,5	109,7	107,8	-122,1	120,2	110,0	2,7	24,5
421	111,9	110,9	107,3	-122,4	119,2	110,0	2,7	48,3
422	110,9	111,9	107,3	-122,3	118,2	110,0	2,8	73,6
423	109,7	112,5	107,8	-122,0	117,5	110,0	2,8	97,2
424	108,7	112,7	108,7	-121,3	117,5	110,0	2,7	118,0
425	113,3	108,4	108,4	-121,4	121,5	110,0	3,2	-0,6
426	113,0	109,7	107,3	-122,4	120,5	110,0	3,4	22,3
427	112,2	111,1	106,8	-123,0	119,1	110,0	3,4	46,2
428	111,1	112,2	106,8	-123,0	118,2	110,0	3,3	67,4
429	109,7	113,0	107,3	-122,3	117,2	110,0	3,3	95,7
430	108,4	113,3	108,4	-121,6	116,9	110,0	3,3	118,0
431	113,9	108,1	108,1	-121,8	121,8	110,0	3,9	-0,4
432	113,5	109,7	106,9	-122,7	120,5	110,0	3,8	23,0
433	112,6	111,2	106,2	-123,4	119,1	110,0	3,9	44,9
434	111,2	112,6	106,2	-123,3	117,8	110,0	3,8	69,2
435	109,7	113,5	106,9	-123,0	116,8	110,0	3,9	91,9
436	108,1	113,8	108,1	-121,9	116,6	110,0	3,8	116,4
437	114,4	107,9	107,9	-122,1	122,2	110,0	4,5	-0,3
438	114,0	109,6	106,5	-123,1	120,5	110,0	4,3	23,1
439	113,0	111,4	105,7	-123,7	118,8	110,0	4,3	47,1
440	111,4	113,0	105,7	-123,7	117,5	110,0	4,3	70,1
441	109,6	114,0	106,5	-123,3	116,5	110,0	4,3	92,0
442	107,9	114,4	107,9	-121,9	115,9	110,0	4,4	119,4

A.2 – SOMENTE HARMÔNICAS

Tabela A2 – Condições com a presença de somente uma ordem harmônica

# ID	Ordem Harmônica	$DIT_h\%$
1	2	1%
2	2	2%
3	2	3%
4	2	4%
5	2	5%
6	2	6%
7	2	7%
8	2	8%
9	2	9%
10	2	10%
11	3	1%
12	3	2%
13	3	3%
14	3	4%
15	3	5%
16	3	6%
17	3	7%
18	3	8%
19	3	9%
20	3	10%
21	5	1%
22	5	2%
23	5	3%
24	5	4%
25	5	5%
26	5	6%
27	5	7%
28	5	8%
29	5	9%
30	5	10%
31	7	1%
32	7	2%
33	7	3%
34	7	4%
35	7	5%
36	7	6%
37	7	7%
38	7	8%
39	7	9%

40	7	10%
41	11	1%
42	11	2%
43	11	3%
44	11	4%
45	11	5%
46	11	6%
47	11	7%
48	11	8%
49	11	9%
50	11	10%
51	13	1%
52	13	2%
53	13	3%
54	13	4%
55	13	5%
56	13	6%
57	13	7%
58	13	8%
59	13	9%
60	13	10%

Tabela A3 – Condições com a presença de duas ordens simultâneas

# ID	Ordem Harmônica	$DIT_h\%$	Ordem Harmônica	$DIT_h\%$	$DTT\%$
1	2	1,0%	3	2,0%	2,2%
2	2	2,0%	3	5,0%	5,4%
3	2	5,0%	3	7,0%	8,6%
4	2	1,0%	5	2,0%	2,2%
5	2	2,0%	5	5,0%	5,4%
6	2	5,0%	5	8,0%	9,4%
7	2	1,0%	7	2,0%	2,2%
8	2	2,0%	7	5,0%	5,4%
9	2	5,0%	7	8,0%	9,4%
10	2	1,0%	11	2,0%	2,2%
11	2	2,0%	11	3,0%	3,6%
12	2	5,0%	11	5,0%	7,1%
13	2	1,0%	13	2,0%	2,2%
14	2	2,0%	13	3,0%	3,6%
15	2	5,0%	13	5,0%	7,1%
16	3	2,0%	5	2,0%	2,8%
17	3	5,0%	5	5,0%	7,1%
18	3	7,0%	5	8,0%	10,6%
19	3	2,0%	7	2,0%	2,8%

20	3	5,0%	7	5,0%	7,1%
21	3	7,0%	7	8,0%	10,6%
22	3	2,0%	11	2,0%	2,8%
23	3	5,0%	11	3,0%	5,8%
24	3	7,0%	11	5,0%	8,6%
25	3	2,0%	13	2,0%	2,8%
26	3	5,0%	13	3,0%	5,8%
27	3	7,0%	13	5,0%	8,6%
28	5	2,0%	7	2,0%	2,8%
29	5	5,0%	7	5,0%	7,1%
30	5	8,0%	7	8,0%	11,3%
31	5	2,0%	11	2,0%	2,8%
32	5	5,0%	11	3,0%	5,8%
33	5	8,0%	11	5,0%	9,4%
34	5	2,0%	13	2,0%	2,8%
35	5	5,0%	13	3,0%	5,8%
36	5	8,0%	13	5,0%	9,4%
37	7	2,0%	11	2,0%	2,8%
38	7	5,0%	11	3,0%	5,8%
39	7	8,0%	11	5,0%	9,4%
40	7	2,0%	13	2,0%	2,8%
41	7	5,0%	13	3,0%	5,8%
42	7	8,0%	13	5,0%	9,4%
43	11	2,0%	13	2,0%	2,8%
44	11	3,0%	13	3,0%	4,2%
45	11	5,0%	13	5,0%	7,1%

A.3 – COMBINAÇÃO DE AMBOS OS DISTÚRBIOS

Para este banco de dados, são selecionadas as seguintes condições da Tabela A2:

Tabela A4 – Condições selecionadas da Tabela A2 (somente uma ordem)

# ID	Ordem Harmônica	$DIT_h\%$
1	2	1,0%
2	2	2,0%
3	2	5,0%
4	3	2,0%
5	3	5,0%
6	3	7,0%
7	5	2,0%
8	5	5,0%
9	5	8,0%

10	7	2,0%
11	7	5,0%
12	7	8,0%
13	11	2,0%
14	11	3,0%
15	11	5,0%
16	13	2,0%
17	13	3,0%
18	13	5,0%

Realiza-se, em seguida, todas as possibilidades de combinação entre todos os valores das Tabelas A3 e A4 (somente harmônicas) com todos os valores da Tabela A1 (somente desequilíbrio), totalizando 27.846 condições combinadas.